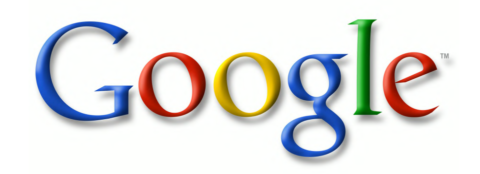
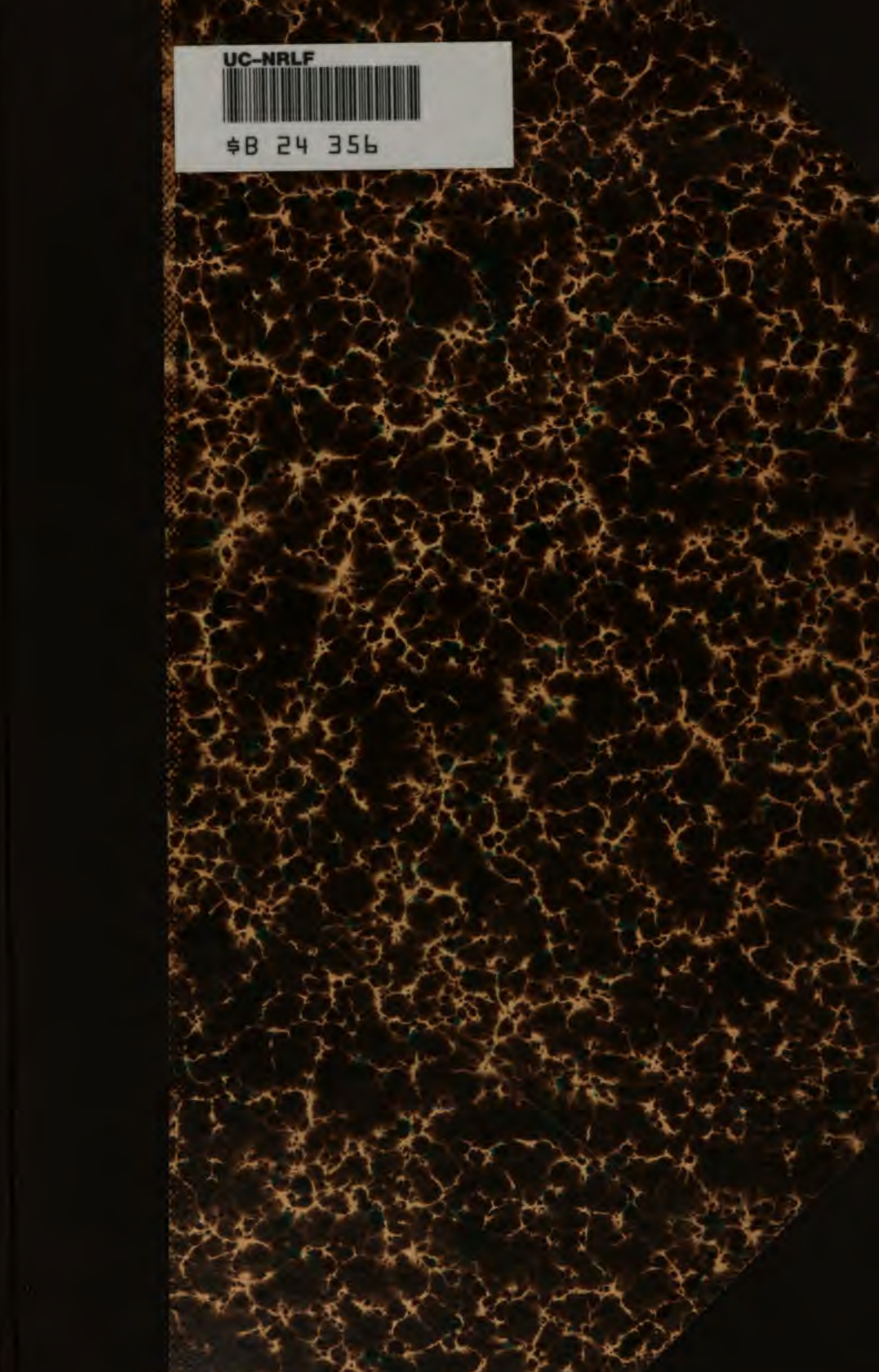
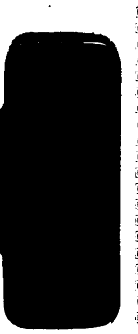
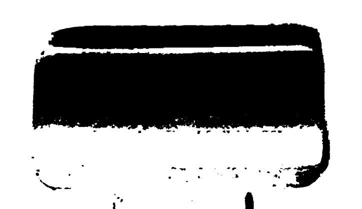





UC-NRLF
$B 24 356







DIE WISSENSCHAFT

SAMMLUNG
NATURWISSENSCHAFTLICHER UND MATHEMATISCHER
MONOGRAPHIEN

FÜNFTES HEFT

DIE
ENTWICKELUNG DER ELEKTRISCHEN MESSUNGEN

VON

DR. O. FRÖLICH

MIT 124 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN

BRAUNSCHWEIG
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN
1905

DIE ENTWICKELUNG

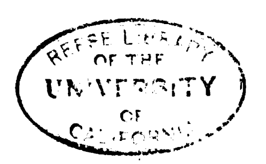
DER

ELEKTRISCHEN MESSUNGEN

VON

DR. O. FRÖLICH

MIT 124 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN



BRAUNSCHWEIG
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN
1905

VORWORT.

Obschon es in unserer Zeit für die Gebiete der Physik nicht an Fachschriften fehlt, welche den Stand unserer Kenntnisse, für den Zeitpunkt ihres Erscheinens, darstellen, fehlt es an historischen Arbeiten, welche die Entwickelung des betreffenden Gebietes beschreiben.

Vielleicht hat die Fülle und Ausdehnung des Stoffes vielfach abgeschreckt, welche um so größer ist, je länger der zu beschreibende Zeitraum der Entwickelung gewählt ist. Da ferner deutsche naturwissenschaftliche Schriftsteller es sich meist zur Pflicht machen, in der Behandlung ihres Gegenstandes die größtmögliche Vollständigkeit anzustreben, werden historische Darstellungen nicht leicht unternommen.

Und doch ist, sowohl für den selbstschaffenden Physiker und Techniker, als für den mehr reflektierend arbeitenden und in pädagogischem Sinne auswählenden Lehrer nichts nützlicher, als die Darstellung des Werdeganges auf einem Gebiete der Physik. Durch solche Schriften wird nicht nur die Überschätzung unterdrückt, welche der moderne Fachmann so leicht den modernen Arbeiten gegenüber den älteren angedeihen läßt, sondern es wird auch oft die Wiederholung eines Gedankenganges vermieden, welcher schon früher durchgearbeitet wurde, und der Geist, der dem betreffenden Gebiete innewohnt, wird erst klargelegt und richtig empfunden, wenn wir die Entwickelung des Gebietes übersehen.

Um diesen Zweck zu erreichen, darf aber die Darstellung keine erschöpfende sein, weil sonst der Umfang zu groß wird und der Gebrauch des Lesers derselben mehr im Nachschlagen, als im zusammenhängenden Lesen besteht; sondern sie muß sich darauf beschränken, die Linien der Entwickelung anzugeben und nur die wichtigeren Erscheinungen zu charakterisieren.

In diesem Sinne bitte ich, die nachstehende historische Skizze aufzufassen und die Subjektivität der Behandlung des Stoffes, welche mit einer solchen auswählenden Darstellung naturgemäß verbunden ist, zu würdigen; ich habe mich bemüht, sowohl in den neueren als den älteren Arbeiten des bearbeiteten Gebietes diejenigen zu besprechen, welche auf die Entwickelung der elektrischen Messungen einen erheblichen Einfluß ausgeübt haben. —

Allen Firmen, welche mich durch Übersendung von Druckschriften und Überlassung von Holzschnitten unterstützt haben, sowie Herrn G. D. Aspinall Parr für die Erlaubnis der Benutzung einer Reihe von Figuren aus seinem Werke „Electrical Measuring Instruments“ danke ich verbindlichst.

Dr. O. Frölich.

INHALTSVERZEICHNIS.

Seite



Die Mefsinstrumente.

Die Entwickelung der elektrischen Meßtechnik spiegelt sich in keinem getreueren Bilde wieder, als in einer chronologisch geordneten Übersicht der Meßinstrumente; sowie eine neue Eigenschaft der Elektrizität entdeckt war, wurden Instrumente konstruiert, um dieselbe quantitativ zu verfolgen, und je weiter die Kenntnis der Elektrizität fortschritt, desto feiner und zugleich einfacher im Gebrauch wurden die Instrumente. Aber nicht nur in ihrer Qualität macht sich ein steter Fortschritt bemerkbar, sondern auch in der Art und der Anzahl der Zwecke, zu deren Erzielung die Instrumente dienen.

Wir verfolgen daher im folgenden nicht nur die Entwickelung der einzelnen Kategorien der Instrumente vom Beginn bis zur Neuzeit, sondern suchen auch diese Kategorien so zu ordnen, wie sie der Zeit nach aufgetreten sind.

Die Strommesser.

Die erste Qualität der Elektrizität, welche beobachtet und gemessen wurde, war nicht der Strom, sondern die Spannung; denn die Kenntnis der Elektrisiermaschine und der verwandten Erscheinungen ist weit älter, als diejenige des elektrischen Stromes. Allein die eigentliche elektrische Meßtechnik nahm erst ihren Anfang, abgesehen von einigen rühmlichen Ausnahmen, als die Wirkung des Stromes auf die Magnetnadel entdeckt war, da die Spannungsmessungen bei den reibungselektrischen Versuchen mehr in Schätzungen bestanden; auch beruht unser heutiges elektrisches Meßwesen in erster Linie auf der Strommessung.

Wir beginnen daher mit den der Strommessung gewidmeten Instrumenten.

a) Die ersten Galvanometer.

Das weitaus wichtigste Meßinstrument ist bekanntlich das Galvanometer, welches auf der Wirkung eines vom elektrischen Strome durchflossenen Drahtes, eines „Stromdrahtes", auf eine bewegliche Magnetnadel beruht. Noch heutzutage werden nach diesem Prinzip sowohl die einfachsten als die feinsten elektrischen Meßinstrumente gebildet. Wenn man vollends die Wirkung von Stromdrähten auf Eisenstücke, also magnetisierbare Körper, als eine Fortbildung dieses Prinzips betrachtet, so fällt der größte Teil unserer, wissenschaftlichen und technischen, elektrischen Meßinstrumente in diese Klasse.

Örsted, Schweigger. Als Örsted in Kopenhagen 1820 die drehende Wirkung entdeckte, welche ein über oder unter einer gewöhnlichen Magnetnadel, parallel zu derselben, liegender Stromdraht ausübte, war dieses Prinzip gegeben. Die Wichtig-

keit desselben wurde auch sofort von der damaligen wissenschaftlichen Welt erkannt; allerwärts wiederholte man Örsteds Versuche und suchte dieselben zu erweitern und die Gründe der Erscheinung klarzulegen.

Aber zunächst wurde beinahe ausschließlich die theoretische Seite der Frage behandelt; man sprach vom „Magnetismus der galvanischen Kette“, von dem Zusammenhange dieses Magnetismus mit den Himmelsrichtungen, seiner Abhängigkeit von der chemischen Tätigkeit in der Kette, von der Identität der galvanischen und magnetischen Kräfte (bei Örsted sogar auch dieser Kräfte mit Wärme und Licht) usw. Mit der Ausbildung des Örstedschen Versuches beschäftigte man sich weniger.

Doch auch in der letztgenannten Richtung wurde bereits 1821 der zunächst wichtigste Fortschritt erzielt durch den Multiplikator von Schweigger, d. h. durch die Erkenntnis, daß die Ableitung der Magnetnadel durch Anwendung einer Anzahl von Windungen bedeutend vergrößert werde. Die völlige Durchführung dieses Gedankens konnte jedoch noch nicht erfolgen, da die exakten Begriffe von Strom und Widerstand damals noch nicht vorhanden waren.

Man beobachtete zwar [1]), nachdem man den Multiplikator mehr und mehr in Gebrauch genommen hatte, daß, wenn die Batterie gegeben ist und man das Galvanometer mit einer steigenden Anzahl von Windungen desselben Drahtes bewickelt, die Ablenkung der Nadel von einer bestimmten Windungszahl an abnimmt, und später auch, daß man bei verschiedenen Stromerregern zweckmäßigerweise verschiedene Wickelungen anzuwenden habe, so z. B. bei Thermosäulen wenige Windungen eines dicken Drahtes, bei galvanischen Batterien von kleinen Dimensionen viele Windungen eines dünnen Drahtes; aber man wußte noch nicht diese Verhältnisse rechnerisch zu beherrschen, da das Ohmsche Gesetz mit seinen Folgerungen noch nicht bekannt war.

Ohm, Ampère, Biot-Savart. Wie nun die Ideen über diese Erscheinungen in den nächsten Jahren, und zwar infolge des allgemeinen Interesses der Physiker verhältnismäßig rasch, sich klärten und die Gesetze sich ergaben, welche noch heute als richtig anerkannt werden, daran wollen wir hier nur erinnern.

[1]) Colladon, Pogg. Ann. 8, 336 (1826).

Ohm[1]) stellte 1826 das Gesetz auf, welches im einfachen Stromkreise zwischen der Stromstärke, den Spannungsdifferenzen und den Widerständen besteht [in seiner Arbeit kommt die Bezeichnung „Widerstand" allerdings noch nicht vor, wohl aber die Größe $k \frac{l}{q}$, oder die Zusammensetzung dieses Begriffs aus Leitungsvermögen (k), Länge (l) und Querschnitt (q)].

Ampère[2]) gab 1820 bis 1825 die Gesetze der Anziehung und Abstoßung, welche Stromelemente und Stromdrähte aufeinander ausüben, und leitete ein allgemeines Gesetz hierüber ab.

Er arbeitete mit für die damalige Zeit sehr starken und nicht ganz leicht herzustellenden Strömen; die von ihm angewendeten beweglichen Drahtgehänge sollen sich stark erwärmt haben, zum Teil glühend geworden sein.

Biot und Savart[3]) stellten das Gesetz auf, welches für die mechanische Wirkung eines Stromelementes auf einen Magnetpol gilt, aus welchem also die Wirkung der Galvanometerwickelung auf die Magnetnadel, wenigstens in einfachen Fällen, sich berechnen läßt.

Nach unseren heutigen Begriffen wäre es beinahe undenkbar, die in diesen klassischen Arbeiten behandelten Gegenstände ohne eine genügend genaue und praktisch leicht anwendbare Methode der Strommessung zu bearbeiten; in jener Zeit gab es jedoch eine solche Methode noch nicht; es ist deshalb interessant zu wissen, wie sich jene Autoren mit dieser Schwierigkeit abfanden.

Ohm maß seine Ströme überhaupt nicht, sondern leitete seine Theorie aus der Analogie mit der bereits von Fourier entwickelten Theorie der Wärmeleitung ab und bestätigte die Ergebnisse durch Spannungsmessungen mittels des Elektrometers.

Ampère ließ sich ebenfalls auf keine Strommessungen ein; er entnahm die Stromrichtungen in den Drähten seiner Stromgehänge aus ihren Verbindungen mit den Batteriepolen, beobachtete die Richtung der erfolgenden Bewegungen und suchte diejenigen Fälle auf, in welchen keine Bewegung erfolgte.

---

[1]) Pogg. Ann. **6**, 450 ff. (1826).

[2]) Ann. de chim. et de phys. **18**, 88 (1821).

[3]) Ann. de chim. et de phys. **15**, 222 (1820), Notiz, ausführlich in Biots Lehrb. d. Physik, übers. von Fechner, **4**, 158 ff.

Biot-Savart waren genötigt, Strommessungen anzustellen, und wählten zu diesem Zweck dasjenige Mittel, welches damals als das einzige sichere bekannt und von den Messungen der horizontalen erdmagnetischen Kraft herübergeholt war, nämlich die Schwingungsdauer, welche die Galvanometernadel unter dem Einfluß des Stromes zeigte, im Vergleich mit der Schwingungsdauer ohne Strom.

Eine Art der Galvanometerkonstruktion und der Strommessung, bei welcher die Stromstärke oder vielmehr die Verhältnisse der Stromstärken sich aus den Ablenkungen ergeben, gab es damals noch nicht.

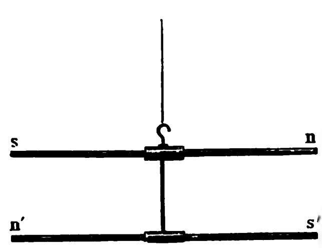
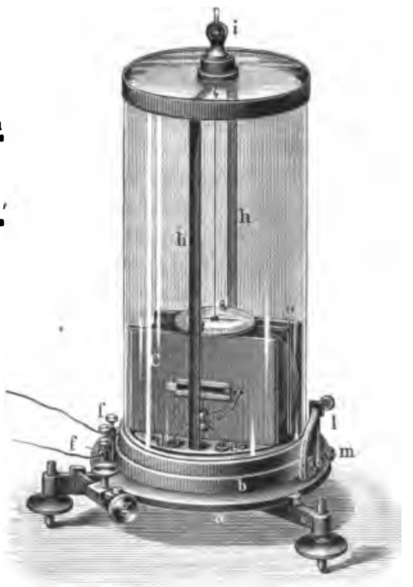


Fig. 1.



Nobili, H. Davy u. Faraday. Trotzdem entwickelte sich schon 1826 eine praktisch sehr brauchbare Form des Galvanometers, welche mehrere Jahrzehnte das Feld beherrschte und allgemein angewendet wurde und auch heutzutage sich wohl in allen physikalischen Kabinetten vorfindet, nämlich das Galvanometer von Nobili[1]) (s. Fig. 1).

In diesem Galvanometer scheint zum ersten Male die astatische Nadel (s. Fig. 1) verwendet zu sein. Die Empfindlich-

[1]) Nobili, Galvanomètre à deux aiguilles. Bibl. universelle **29**, 119. Pogg. Ann. **8**, 338 (1826).

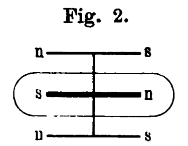
keit wird bekanntlich durch dieses Nadelsystem bedeutend gesteigert, indem nicht nur die Wirkung der Stromwindungen auf die Nadel ungefähr verdoppelt, sondern auch die richtende Kraft des Erdmagnetismus sehr verringert wird, indem dieselbe auf zwei entgegengesetzt und beinahe gleich magnetisierte Nadeln wirkt.

Die obere Nadel bewegte sich über, die untere Nadel im Hohlraume des Multiplikators; das die Nadeln verbindende Stück war möglichst leicht, z. B. aus einem Strohhalm, hergestellt; das von den beiden Nadeln gebildete System war durch einen Kokonfaden an einem feststehenden Messingarme aufgehängt und ließ sich mittels einer am Aufhängepunkte angebrachten Schraubvorrichtung, ohne Torsion, heben und senken. Die Wickelung bestand aus einer Anzahl von Windungen eines mit Seide besponnenen Kupferdrahtes (in obigem Exemplare etwa 0,4 mm dick); bei Versuchen mit Reibungs- oder atmosphärischer Elektrizität war der Wickelungsdraht isoliert. Ein feststehender Richtmagnet zur besseren Fixierung der Ruhelage scheint erst später angebracht worden zu sein. An dem Nadelsysteme war ein leichter Zeiger befestigt, welcher über einer Kreisteilung spielte und die Größe der Ablenkung anzeigte.

Mit diesem Instrumente wurden schon damals bei galvanischen Batterien, Thermoelementen, bei der Glimmentladung von Elektrisiermaschinen und Leydener Flaschen-Batterien, bei der auf Blitzableiter wirkenden atmosphärischen Elektrizität, kräftige Wirkungen erzielt.

Sir Humphrey Davy[1]) gab eine Modifikation dieses Instrumentes an, von welcher er die doppelte Wirkung des Nobilischen erwartete; zu demselben sind drei abwechselnd magnetisierte Nadeln verwendet (s. Fig. 2), es ist also eine dritte unter der Wickelung spielende Nadel zugefügt. Da hierbei jedoch das magnetische Moment der mittleren Nadel etwa doppelt so stark sein muß als dasjenige der anderen, so ist die Wirkung dieselbe, als wenn man bei der Nobilischen Anordnung zwei gleiche, fest aneinander geklemmte astatische Nadeln statt einer einzigen verwendet; ein

Fig. 2.



---

[1]) Phil. Transactions 116, 391 (1826).

Fortschritt gegenüber der Nobilischen Anordnung wird also hierdurch nicht erzielt.

Wie allgemein und wie andauernd die Anwendung des Nobilischen Galvanometers war, zeigt sich daran, daß Faraday in seinen so großartigen und ausgedehnten Experimentaluntersuchungen über Elektrizität (1832 bis 1855) sich nie eines anderen Galvanometers bedient hat als des Nobilischen[1]), und nicht versucht hat, dasselbe abzuändern oder zu verbessern. In denjenigen Fällen, in welchen er Ströme messen mußte, half er sich auf einfachste, allerdings nicht genaueste Weise: als er die Identität der aus verschiedenartigen Quellen stammenden Elektrizität nachweisen wollte, ordnete er die Versuche so an, daß stets ungefähr dieselbe Ablenkung an seinem Galvanometer erfolgte[2]); und bei der Auffindung und dem Beweise des heute nach ihm benannten elektrolytischen Grundgesetzes wandte er als Strommesser einen Wasserzersetzungsapparat[3]) an, dem er verschiedene Formen gab, bis die Konstruktion ihn befriedigte.

Es wäre sehr ungerecht, wenn man den Wert der Faradayschen Arbeiten, welche, wie die Arbeiten keines Anderen, die physikalische Welt des vorigen Jahrhunderts beherrschten, wegen des Mangels genauerer Strommessungen niedriger einschätzen wollte. Faraday beschäftigte sich mit der Konstruktion von Meßinstrumenten nur, wenn es seine Arbeiten verlangten, dann aber in genügender Weise; allerdings hatte er keine „Meßfreudigkeit“, wie z. B. Gauss und Weber; seine hohe Bedeutung lag auf anderen Gebieten.

Die Notwendigkeit der Kalibrierung des Galvanometers, d. h. die Reduktion der Ablenkungen auf Stromstärken, machte sich nach der Konstruktion des Galvanometers bald geltend. Die Versuche der Lösung dieser Aufgabe waren anfangs ungenügend, namentlich weil man noch nicht wußte, in exakter Weise Stromstärken verschiedener Größe herzustellen, und weil die hierzu notwendige Anwendung des Ohmschen Gesetzes erst allmählich durchdrang, und auch die Bestimmung von Widerständen erst ihren Anfang nahm.

---

[1]) Pogg. Ann. **25**, 122 (1832) ist sein Galvanometer beschrieben; dasselbe weicht von dem Nobilischen nicht ab.

[2]) Ebend. **29**, 373 ff. (1833).

[3]) Ebend. **33**, 317 ff. (1834).

Von solchen ersten Versuchen der Kalibrierung, welche ihren Zweck schon damals im wesentlichen erreichten, sind höchstens diejenigen zu erwähnen, welche sich der Thermoelektrizität bedienten; denn diese Art der Erzeugung des elektrischen Stromes, deren Entdeckung in die Zeit der ersten Galvanometer hineinfiel [1]), hat bekanntlich den Vorzug, daß die erzeugte elektrische Spannung, innerhalb eines gewissen Bereiches, proportional der Temperaturdifferenz ist, daß die elektrischen Spannungen also leicht und richtig abgestuft werden können.

Man graduierte daher Galvanometer teils durch den Strom eines Thermoelements bei verschiedenen Temperaturdifferenzen oder durch verschiedene Einstrahlungen, von bekanntem Intensitätsverhältnis, auf die von Nobili [2]) konstruierte Thermosäule. Diese Methoden ließen jedoch, wegen der Schwäche der elektromotorischen Kräfte, eine allgemeinere Anwendung nicht zu.

Kalibrierung. Eine Art der Kalibrierung, welche bei umsichtiger Ausführung exakte Resultate liefert, gab Petrina [3]). Er führt einen konstanten Strom durch eine Quecksilberrinne, legt in dieselbe in gemessener Entfernung die Enden des Galvanometers, so daß ein Zweigstrom dasselbe durchfließt, und erhält durch Variierung dieser Entfernung verschiedene Stromstärken im Galvanometer, welche im wesentlichen dieser Entfernung proportional sind und deren Verhältnisse sich aus den bezüglichen Widerständen berechnen lassen. Petrina gibt diese Berechnung auf Grund des Ohmschen Gesetzes, und es ist erwähnenswert, daß dies die erste praktische Benutzung dieses Gesetzes ist, welche sich in Pogg. Ann. vorfindet, 16 Jahre nach dem Erscheinen der Ohmschen Abhandlung.

Eine allgemeine Lösung der Frage der Kalibrierung glaubte Poggendorff [4]) zu geben, indem er die Formel aufstellte:

$$i = \frac{\sin n}{\sin (n + m)},$$

wo i der Strom, n die Ablenkung der Nadel und m eine von der Ablenkung abhängende Größe. Genau und auf beliebige Galvano-

[1]) Pogg. Ann. 6, 1, 133, 253 (1823).
[2]) Ebend. 20, 245 (1830).
[3]) Ebend. 57, 111 ff. (1842).
[4]) Ebend. 57, 609 (1842).

meterformen anwendbar kann diese Formel nicht sein; auch ist die Aufgabe der Kalibrierung eigentlich nur auf eine andere reduziert, nämlich die Bestimmung von m als Funktion von n. Praktische Anwendung scheint dieselbe auch nicht gefunden zu haben.

b) Die Spiegelgalvanometer.

Das Problem der genauen Strommessung mittels des Galvanometers wurde in einwandsfreier Weise gelöst, und die Strommessung auf beinahe astronomische Genauigkeit gebracht von Gauss und W. Weber.

Gauss. Den Ausgangspunkt der klassischen Arbeiten dieser beiden Männer bildete die Idee von Gauss, die Bestimmungen des Erdmagnetismus, welche schon damals eine bedeutende Ausdehnung erlangt hatten, aber auf der nie ganz sicheren Konstanz des Magnetismus von bestimmten Magnetstäben basierten, auf ein einheitliches, von der Zeit unabhängiges, und nur aus den Begriffen der Länge, der Masse und der Zeit abzuleitendes Grundmaß zurückzuführen. Daß die magnetischen und elektrischen Werte, mit welchen die Physiker stets, trotz aller Fortschritte, mehr oder weniger phantastische Vorstellungen verknüpften, überhaupt auf die realen mechanischen Grundbegriffe sich zurückführen lassen, haben erst Gauss und W. Weber gezeigt, während z. B. die nicht lange vorher erschienene Theorie des Magnetismus von Poisson auf einem magnetischen, d. h. hypothetischen Grundmaße aufgebaut war.

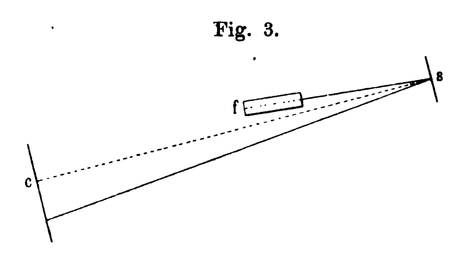
Der Hauptapparat, mit welchem Gauss diese Aufgabe löste, das Magnetometer, ergab dann, einfach durch Beifügung einer Drahtwickelung für den elektrischen Strom, ein Galvanometer, mittels dessen sich elektrische Ströme nicht nur sehr genau messen, sondern auch ebenfalls auf die oben genannten Grundmaße zurückführen ließen.

Um aus den Begriffen des magnetischen Moments eines Magnetstabes und der Intensität des Erdmagnetismus das „Magnetische“ herauszuschaffen, verfuhr Gauss in der Weise, daß er von zwei Magnetstäben für jeden die Schwingungsdauer, unter dem Einfluß der horizontalen erdmagnetischen Kraft, und die Ablenkung, welche der eine an dem frei aufgehängten anderen

verursachte, bestimmte; hieraus ergaben sich alsdann die bezüglichen magnetischen Momente und die horizontale erdmagnetische Intensität in jenen Grundmaßen.

Spiegelablesung. Die Genauigkeit und Sicherheit der Gaussschen Bestimmungen beruhte wesentlich auf der Methode der Spiegelablesung, welche bereits Poggendorff[1]) angegeben hatte und deren Gebrauch von da ab sich allgemein für feinere Instrumente einbürgerte. Diese Methode besteht darin, daß (Fig. 3) in der Mitte des beweglichen Magnetes (bei den mächtigen Magneten von Gauss und W. Weber auch an den Endflächen) ein vertikaler Spiegel s befestigt und gegen denselben, in der Entfernung von mehreren Metern, ein feststehendes Fernrohr f gerichtet, und senkrecht zum Fernrohr eine Skala c, meist eine auf Holz geklebte Papierskala, befestigt wird. Man sieht alsdann im Fernrohre das Spiegelbild der Skala; die Stelle der Skala, auf welcher der vertikale Faden des Fadenkreuzes im Fernrohre gesehen wird, ist bezeichnend für den Stand der Magnetnadel. Die Ablenkung der Magnetnadel erscheint durch die Reflexion am Spiegel verdoppelt; durch die Vergrößerung des Fernrohres sieht man die Stelle vergrößert und kann daher noch sehr kleine Veränderungen des Standes der Nadel beobachten, z. B. tausendstel Winkelgrade, während bei der direkten Ablesung, z. B. bei dem Nobilischen Galvanometer, höchstens ganze oder halbe Winkelgrade sich sicher messen lassen.

Fig. 3.



Die Spiegelablesung umfaßt ihrer Natur nach nur einen geringen Bereich der Nadelablenkung, gestattet aber innerhalb desselben eine sehr genaue Messung. Innerhalb eines so kleinen Bereiches aber kann, bei einem beliebig gestalteten Galvanometer, die Ablenkung der Nadel als proportional dem durch die Wickelung fließenden Strome angesehen werden; die Schwierigkeiten der Kenntnis der Galvanometerfunktion, d. h. der Abhängigkeit

[1]) Pogg. Ann. 7, 121 (1826).

der Nadelablenkung vom Strome, welche sich um so mehr geltend machen, je größer die Ablenkung ist, fallen daher bei der Spiegelablesung fort, und es bietet daher ein Galvanometer mit Spiegelablesung die sicherste und genaueste Methode der Strommessung.

Ist keine Wickelung und kein Strom vorhanden und erfolgt die Ablenkung durch einen zweiten Magneten, so sind die Vorzüge der Ablesungsmethode dieselben; und deshalb wendet sie Gauss für seine absoluten magnetischen Bestimmungen an.

Aber auch die Schwingungsdauer eines Magnets läßt sich auf diese Weise am genauesten bestimmen, wenn man zugleich die Magnete lang und schwer, und die Aufhängungsfäden nicht viel stärker wählt, als zu dem Tragen des Gewichtes des Magnets nötig ist. Dann sind nämlich die Schwingungen langsam und nehmen mit der Zeit langsam in der Amplitude ab, weil die Torsionskraft der Aufhängung, welche außer dem Luftwiderstande die Verringerung der Schwingungsamplituden verursacht, klein ist im Verhältnis zu der magnetischen Richtkraft. Die Beobachtung der Schwingungsdauer ist daher leicht und genau.

Interessant ist hierbei auch die Art, wie Gauss die Torsionskraft der Aufhängung behandelte. Coulomb[1]) hatte noch bei seiner Drehwage diese Kraft als Maß benutzt, indem er, nachdem die aufgehängte Kugel elektrisch abgelenkt war, den Aufhängefaden so lange tordierte, bis die elektrische Kraft durch die Torsionskraft kompensiert war. Gauss konnte diese Methode nicht anwenden, weil seine Messungen absolute, nicht relative waren, und er auch die Torsionskraft in absolutem Maße bestimmen mußte, und weil außerdem die Konstanz der Torsionskraft bei keinem Material ganz zuverlässig ist; er ordnete deshalb seine Apparate so an, daß die Torsionskraft nur den Charakter einer Korrektion erhielt.

Gauss und W. Weber. Da heutzutage die Galvanometer von Gauss und W. Weber nicht mehr verwendet werden, ist es interessant, die Einrichtung eines solchen[2]) näher kennen zu lernen, das sowohl zu magnetischen als galvanischen Messungen benutzt wurde.

---

[1]) Gren, Neues Journal der Physik 3, 52.

[2]) W. Weber, Göttinger gelehrte Anzeigen 1833, S. 205 ff.

Der Magnetstab dieses Galvanometers war etwa 30 cm lang, sein Gewicht betrug etwa 0,5 kg.

Die Seidenfäden, an denen der Magnet aufgehängt war, hatten eine Länge von je etwa 75 cm; die Anzahl dieser Fäden war 32; die Anspannung der Fäden mag etwa die Hälfte ihrer absoluten Festigkeit, d. h. des Gewichtes, bei welchem sie zerreißen würden, betragen haben. Das obere Ende der Fadenaufhängung ließ sich drehen und der Betrag der Drehung an einem Teilkreise ablesen.

An jedem Ende des Magnetes war ein Planspiegel befestigt (je nach der Lokalität wurde der eine oder der andere benutzt); dieselben ließen sich durch Korrektionsschrauben, nach besonderen Beobachtungen, senkrecht zu der magnetischen Achse der Nadel stellen.

Dem Spiegel gegenüber war ein terrestrisches Fernrohr aufgestellt, und über oder unter demselben eine horizontale, in Millimeter geteilte Skala von etwa 120 cm Länge. Die Entfernung zwischen Mitte des Magnetes und Skala betrug etwa 500 cm. Ein Skalenteil entsprach einem Winkel von nahe 22 Bogensekunden, und ein nur etwas geübtes Auge teilte diesen Winkel noch leicht in 10 Teile; es ließ sich also noch sicher ein Winkel von etwa $^1/_{1800}$ Grad messen.

Der Magnet war selten ganz in Ruhe, namentlich infolge der Veränderung des Erdmagnetismus war das Skalenbild im Fernrohre beinahe stets in einer geringen Bewegung begriffen; man beobachtete die Umkehrpunkte der einzelnen Schwingungen und konnte durch einfache Rechnung die für einen bestimmten Zeitpunkt geltende Ruhelage des Magnetes berechnen, z. B. vormittags, zu welcher Zeit die Veränderungen des Erdmagnetismus am stärksten waren, von Minute zu Minute.

Die Schwingungsdauer des Magnetes war stets eine große, bei den am stärksten magnetisierten Magneten etwa 14 Sekunden; dieselbe ließ sich aufs schärfste bestimmen, so daß bei gehöriger Aufmerksamkeit man nie um ein ganzes Zehntel einer Zeitsekunde für die Dauer einer Schwingung im Zweifel sein konnte. Man brauchte nur ein paar Schwingungen beobachtet zu haben, um die Dauer einer Schwingung so scharf zu kennen, daß man die Nadel sich selbst überlassen durfte, und doch, wenn man nach einer und selbst mehreren Stunden wieder hinzukam, über

die Anzahl der Schwingungen, welche die Nadel in der Zwischenzeit gemacht hatte, durchaus nicht ungewiß war.

Ein Vorzug dieser Instrumente bestand auch darin, daß der Beobachter sich weit vom Magnet befand, seine eigene Wärme und diejenige der Beleuchtungsflamme, und der Magnetismus des Eisens oder Messings, welches er bei sich führte, nicht auf den Magnet störend einwirken konnten.

Der Verfasser der Notiz, W. Weber, sieht den Hauptvorteil dieser Einrichtung in der scharfen Bestimmung der Schwingungsdauer und findet es unbegreiflich, daß man sich bisher zu diesem Zwecke meist äußerst kleiner Nadeln bedient hatte. Er findet es vielmehr vorteilhaft, die oben beschriebenen Dimensionen noch weit zu überschreiten und z. B. Magnete von 2 und 3 kg Gewicht anzuwenden; die magnetischen Beobachtungen würden alsdann den feinsten astronomischen Beobachtungen nichts nachgeben.

Die auf diese Weise eingerichteten Galvanometer hält W. Weber für die schärfsten und bequemsten, sowohl für die stärksten als auch für die schwächsten Kräfte eines galvanischen Stromes; für starke Ströme bringt er den den Strom führenden Draht in beträchtlicher Entfernung vom Magneten an, für schwache Ströme umgibt er den Magnet mit einem Multiplikator, d. h. einer Drahtwickelung; wenn ferner ein astatisches Nadelsystem angewendet werde, so würde nach seiner Meinung keine elektromagnetische Kraft zu klein sein, um nicht noch mit äußerster Schärfe gemessen werden zu können.

Methoden von W. Weber. Die Messung der Ströme durch eine oder mehrere Ausschläge gab eine Genauigkeit und Bequemlichkeit, wovon die bisherige mühsame Methode, vermittelst beobachteter Schwingungszeiten, weit entfernt blieb.

Diese Methode der Strommessung und die zugehörigen Instrumente wurden von W. Weber, namentlich für seine absoluten elektromagnetischen Bestimmungen, in Verbindung mit den nötigen mathematischen Betrachtungen, mit der größten Schärfe und minutiöser Ergründung der Nebenwirkungen, in langjähriger Arbeit (von 1846 bis etwa 1857) entwickelt. Wir können hier aus diesen Arbeiten nur dasjenige in Konstruktion und Behandlung des Galvanometers, was den modernen Elektriker interessieren kann, kurz erwähnen.

Vor allem muß nochmals darauf hingewiesen werden, daß in der Regel bei diesen Instrumenten der Magnet stets in Bewegung begriffen war und sich daher nur die Umkehrpunkte der Schwingungen beobachten ließen, und die Ruhelagen des Magnets, welche der Ab- oder Anwesenheit des Stromes entsprechen, durch Rechnung aus den Schwingungsumkehrpunkten abgeleitet werden mußten. War der Magnet stark in Bewegung und sollte die Ruhelage ohne Strom bestimmt werden, so wurden besondere Gegenströme in das Galvanometer geschickt, welche die Schwingungen so verkleinerten, daß dieselben nur wenig von der Ruhelage abwichen und diese sich leicht bestimmen ließ.

Ob es sich nun um dauernde konstante oder langsam sich verändernde Ströme, oder um Stromstöße, z. B. bei Induktionen, handelte, stets wurde die Meßmethode auf Schwingungsbeobachtungen basiert und so eingerichtet, daß nicht nur die Stromstärke oder der Stromstoß, sondern auch die stromlose Ruhelage und die Abnahme der Schwingungsamplituden oder das sogenannte logarithmische Dekrement, aus den Beobachtungen sich berechnen ließ. Die Berechnung der Resultate, auf Grund der entwickelten Theorie des Versuches, nahm denn auch meist beträchtlich mehr Zeit in Anspruch als die Beobachtung.

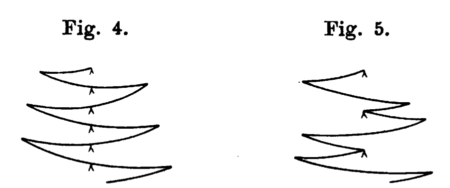
Bei diesen Meßmethoden wurde nun die Stromgebung so eingerichtet, daß sie die Berechnung der Resultate erleichterte. Zu diesem Behufe wurde mittels Stromschlüssel oder Stromwender bei Umkehrpunkten, oder, wenn das Skalenbild durch die Nulllage ging, der Strom gegeben, geöffnet oder umgekehrt; dies wurde eine Anzahl von Malen fortgesetzt, bis die Schwingungen nahezu denselben Verlauf zeigten.

Charakteristisch für diese Art der Beobachtung sind die beiden folgenden Methoden.

Die Multiplikationsmethode (s. Fig. 4) dient dazu, für schwache Stromstöße möglichst starke Ausschläge zu erhalten. Der erste Stromstoß wird dem in relativer Ruhe befindlichen Magnet erteilt, der zweite in umgekehrter Richtung, in dem Augenblicke, in welchem der Magnet, von seinem ersten Umkehrpunkte zurückkehrend, an der Ruhelage vorbeikommt, der dritte wieder in der Richtung des ersten Stoßes, wenn der Magnet, von dem zweiten Umkehrpunkte zurückkommend, von der anderen Seite herkommend, an der Ruhelage vorbeikommt usw. Die

Schwingungen werden hierbei immer größer, erreichen aber bald Maxima zu beiden Seiten der Ruhelage, welche man um so genauer beobachten kann, als man die Stellen der Umkehrpunkte bereits kennt und das Auge auf diese Stellen richten kann, bevor das Bild in der Umkehr einen Augenblick still steht. Die mittlere Ruhelage ergibt sich alsdann als das arithmetische Mittel der Umkehrpunkte und braucht nicht besonders beobachtet zu werden.

Fig. 4. Fig. 5.



Dieselbe Methode läßt sich auch für konstante Ströme anwenden, wenn man immer im Augenblick der Umkehr den Strom wechselt.

Die Zurückwerfungsmethode bezweckt, außer der Stärke des Stromstoßes, auch das logarithmische Dekrement, d. h. die Abnahme der Schwingungsamplituden, zu bestimmen, während bei der Multiplikationsmethode das logarithmische Dekrement, dessen Kenntnis stets zur Berechnung der Schwingungen notwendig ist und in seiner Größe von den Versuchsbedingungen abhängt, durch eine besondere Beobachtungsreihe bestimmt werden mußte.

Bei dieser Methode (s. Fig. 5) gibt man den ersten Stromstoß von der Ruhelage aus, läßt dann nach der ersten Umkehr den Magnet, ohne Strom zu geben, nach der anderen Seite schwingen, und gibt den zweiten Stromstoß in der umgekehrten Richtung, wenn der Magnet nach der zweiten Umkehr an der Ruhelage vorübergeht. Während die erste Schwingung ein Maß des Stromstoßes, beeinflußt von dem logarithmischen Dekrement, gibt, liegt in der Verkleinerung, welche die Amplitude der zweiten Schwingung gegenüber derjenigen der ersten zeigt, ein Maß des logarithmischen Dekrements. Wird dieses Spiel so lange wiederholt, bis die Umkehrpunkte im wesentlichen dieselben bleiben, so liefern diese maximalen Umkehrpunkte die Grundlagen der Berechnung.

Auch hier kann die während der Schwingungen herrschende Ruhelage aus den Umkehrpunkten berechnet, und vor und nach der Beobachtungsreihe direkt beobachtet werden.

Die berechnete Ruhelage war bei diesen Galvanometern ungemein fest, weil ihre Veränderung nur von Veränderungen des Erdmagnetismus abhing; Beobachtungsreihen, während welcher die Ruhelage um ein geringes schwankte, wurden mit großer Strenge verworfen. Je mehr man später zu kleineren und leichteren Magneten, bei Spiegelgalvanometern, überging, um so mehr wurden die Ruhelagen unsicher.

Telegraphie und Spiegelgalvanometer. Dieselben großen Spiegelgalvanometer, mit welchen Gauss und W. Weber ihre magnetischen und elektrischen Untersuchungen ausführten, erlangten damals Weltruf durch ihre Anwendung auf elektrische Telegraphie (1833).

Gauss arbeitete in Göttingen auf der Sternwarte, W. Weber im Universitätsgebäude, beide mit Spiegelgalvanometern und im steten gegenseitigen Gedankenaustausch, der aber durch die Zeit, welche die gegenseitigen Besuche in Anspruch nahmen, behindert war. Sie kamen auf den Gedanken, auf ähnliche Weise, wie sie in ihren Laboratorien so viele stromleitende Drähte gezogen hatten, auch solche zwischen der Sternwarte bzw. dem magnetischen Observatorium und der Universität zu ziehen und sich magnetoelektrische Zeichen zu übermitteln, indem der Eine dem Galvanometer des Anderen Stromstöße in wechselnder Richtung und in verschiedenen Kombinationen übersandte. Hierbei waren die Magnete der Galvanometer in der Regel nicht etwa in Ruhe, sondern in Schwingungen begriffen; trotzdem waren die Stromstöße deutlich bemerkbar.

In ganz ähnlicher Weise hat, viel später, Sir W. Thomson (Lord Kelvin) die Telegraphie auf dem ersten atlantischen Kabel (1858) eingerichtet, mit Spiegelgalvanometern und Stromstößen einer Batterie. Bei diesen Instrumenten, welche wir später erwähnen werden, hatten die Magnete aber nur etwa den hundertsten Teil des Gewichtes, wie bei Gauss und W. Weber, ganz kurze kräftige Aufhängungsfäden und eine eigene Art der Justierung; die Geschwindigkeit der telegraphischen Zeichen war eine weit größere. Aber die Schwierigkeit, trotz starken Wechsels der Ruhelage der Instrumente zu telegraphieren, war in

beiden Fällen dieselbe, da in langen Kabeln stets stark wechselnde Erdströme herrschen; und sie wurde in beiden Fällen auf dieselbe Weise überwunden, nämlich durch Superposition der telegraphischen Zeichen auf die Bewegung der Nadel.

Dämpfung. Die Spiegelgalvanometer von Gauss und W. Weber bürgerten sich nicht ein, außer in einigen deutschen physikalischen Kabinetten, z. B. Königsberg, wo F. E. Neumann in derselben Art, d. h. mit derselben Genauigkeit und Strenge, mit steter Zuhilfenahme von Mathematik, und ohne Rücksichtnahme auf Zeit und Mühe der Rechnung, arbeitete. Daß z. B. 1842 diese Instrumente in Frankreich unbekannt waren, konnte Poggendorff konstatieren.

Die Gründe hiervon mögen an folgenden Ursachen gelegen haben. Zunächst lassen sich diese Galvanometer beinahe gar nicht transportieren, sondern sind an einen festen Standort gebunden und nehmen ziemlich viel Raum ein; der Physiker oder Techniker zieht aber ein leicht oder wenigstens ohne Schwierigkeit transportierbares Instrument vor, da er oft mit den übrigen Versuchsapparaten an einen bestimmten Standort gebunden ist.

Die Rücksichten auf absolute Messungen, aus denen eigentlich die Gauss-Webersche Form des Apparates entstanden ist, können meist wegfallen.

Die wesentlichsten Gründe aber, welche die allgemeinere Einführung dieser Galvanometer verhinderten, liegen in den Rücksichten auf Einfachheit der Behandlung und auf Raschheit der Messung. Man will eine möglichst feste Ruhelage haben, nicht die Ruhelage erst aus den Schwingungen berechnen; auch von der Ablenkung durch den Strom wünscht man, daß dieselbe unmittelbar sichtbar sei, nicht erst aus Schwingungen berechnet werden müsse, und daß die Schwingungen, welche der Magnet macht, bevor er die feste Ablenkung einnimmt, rasch verlaufen. Ist der Strom veränderlich, wie bei physiologischen Beobachtungen oder der elektrischen Messung einer veränderlichen Temperatur, so wird vom Galvanometer verlangt, daß es diese Änderungen rasch und sicher anzeige.

Diese Forderungen ließen sich nur einigermaßen erfüllen, indem man einerseits das Trägheitsmoment und die auf das Magnetsystem wirkende Richtkräft der Erde oder Richtmagnete verminderte und die sogenannte Dämpfung vergrößerte.

Die Dämpfung zeigt sich an der Abnahme der Schwingungsamplituden und stimmt mit dem logarithmischen Dekrement von Gauss und W. Weber überein; indem man dem schwingenden Magnet irgendwelche Bewegungshindernisse entgegenstellt, sollen die Schwingungen schnell abnehmen und der Gleichgewichtszustand bald erreicht werden. Zur Erzeugung solcher Hindernisse oder Widerstände bedient man sich der Reibung in einer Flüssigkeit oder des Widerstandes der Luft, für genaue Instrumente aber namentlich der elektrischen Dämpfung. Diese letztere wird hervorgebracht, indem man den Magnet mit einem Körper aus einem elektrisch gut leitenden Material, z. B. Kupfer, umgibt; wenn der Magnet schwingt, werden in diesem Körper Ströme induziert, welche nach dem Lenzschen Gesetze stets so verlaufen, daß ihre Rückwirkung auf den Magnet dessen Schwingungen sich entgegensetzt und dieselben dämpft oder beruhigt. Natürlich muß dieser Körper so geformt sein, daß die induzierten Ströme in demselben einen kurzen und geschlossenen Weg finden, also namentlich in Kreisen in Ebenen, die auf der Bewegungsebene der Magnetpole senkrecht stehen. Da diese „Dämpfer" in der Nähe der schwingenden Magnete liegen müssen, um genügend stark zu wirken, so nehmen dieselben den Drahtwindungen Platz weg, verringern also die Empfindlichkeit; es ist daher Sache des Konstrukteurs, diese Forderungen auszugleichen.

Um also rasche Beruhigung der Schwingungen zu erzielen, wählt man einen kurzen, leichten Magnet, vermindert die Richtkraft durch Astasie, d. h. indem man die Richtkraft der Erde durch einen entgegenwirkenden, fest in der Nähe des beweglichen Magnets des Galvanometers angebrachten Richtmagnet schwächt, oder als bewegliches Magnetsystem ein astatisches verwendet, und bringt eine Kupferdämpfung an; man erhält alsdann eine kräftige Beruhigung der Schwingungen und die konstante Ablenkung oder die feste Ruhelage wird viel rascher erreicht, als bei den Instrumenten mit langen schweren Magneten und geringer Dämpfung.

Verringert man nun weiter die Richtkraft durch Vergrößerung der Astasie oder vergrößert die Dämpfung durch Annähern des Kupferkörpers, so verringert sich die Anzahl der Schwingungen immer mehr, und man erhält allmählich den sogenannten aperio-

dischen Zustand, auf den namentlich du Bois-Reymond[1]) aufmerksam machte, d. h. einen Zustand ohne Schwingungen, in welchem der Magnet, wenn konstanter Strom gegeben wird, sogleich in die feste Ablenkung sich einstellt, und umgekehrt, wenn der Strom aufhört, sogleich in die feste Ruhelage zurückkehrt. Vermehrt man die Dämpfung oder die Astasie noch weiter, so geschieht die Einstellung in die feste Ablenkung oder die feste Ruhelage immer langsamer; man vermeidet daher diesen sogenannten überaperiodischen Zustand und sucht den beinahe aperiodischen Zustand, oder den Zustand mit einer kleinen Schwingung, herzustellen.

Daß gerade einem Physiologen, wie du Bois-Reymond, das Bedürfnis nach Aperiodizität des Galvanometers sich fühlbar machen mußte, ist verständlich; denn bei den physiologischen Versuchen ist der Strom selten konstant, und der Beobachter muß trachten, wenigstens einige Punkte der Stromkurve sicher festzustellen.

Auf dieser Linie bewegte sich nun im wesentlichen die Verbesserung der Spiegelgalvanometer seit Gauss und Weber, also in dem Sinne rascherer und einfacherer Handhabung; außerdem suchte man aber, sowohl in der Wissenschaft als in der Technik, immer höhere Empfindlichkeiten zu erzielen, um die in dieser Beziehung stets wachsenden Anforderungen zu erfüllen. Die Vergrößerung der Empfindlichkeit scheint mit der Verkürzung der Magnete im Widerspruch zu stehen, da durch dieselbe auch der Hebelarm, an welchem die Stromwirkung angreift, verkürzt wird; gleichzeitig kann man aber auch größere Astasie anwenden, ohne daß das schädliche „Wandern des Nullpunktes" eintritt, weil der Hebelarm der magnetischen Richtkraft ebenfalls verkürzt wird. Jedenfalls ist es eine Tatsache, daß unter gleichen Umständen die Empfindlichkeit sich steigerte, je kürzer und leichter das Magnetsystem gewählt wurde.

Spätere Spiegelgalvanometer. Ein sehr brauchbares Instrument mit Dämpfung war das Spiegelgalvanometer von Wiedemann[2]) (s. Fig. 6). In demselben hat der Stahlmagnet die Form

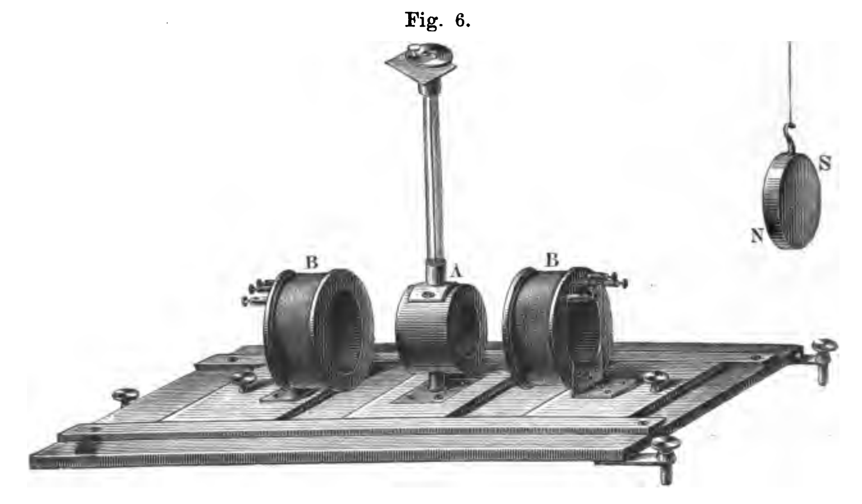
---

[1]) Berl. Monatsschr. d. Akad. d. Wiss. 1869, S. 806 ff.

[2]) Wiedemann, Pogg. Ann. 89, 504 (1853). W. Weber hatte bereits ebenfalls Kupferdämpfer und Magnetspiegel verwendet.

einer dünnen Scheibe (*NS*), welche mittels eines Häkchens an einem Kokonfaden aufgehängt und so magnetisiert ist, daß die magnetische Achse *NS* horizontal liegt; die Lage der magnetischen Achse ist also nicht durch die Form des Stabes gegeben, wie beim Magnetstab, sondern muß durch die Art der Magnetisierung erzielt werden. Die Magnetscheibe ist plan geschliffen und dient zugleich als Spiegel. Dieser Magnet schwingt in einer dicken Kupferhülse *A*, auf welche, um Luftzug zu vermeiden, Spiegelglasplatten gekittet werden. Auf der Kupferhülse sitzt ein Glasrohr mit kupfernem Kopf und einem drehbaren Knöpf-

Fig. 6.



chen, an welchem der Kokonfaden befestigt ist; durch Verschieben einer seitlich eingesteckten, mit Einschnitt für den Faden versehenen Elfenbeinplatte wird der Faden zentriert. Über die Kupferhülse *A* können die verschiebbaren Drahtrollen *BB* gesteckt, oder auch, bei stärkeren Strömen, von derselben entfernt werden. Der Apparat wird so aufgestellt, daß die Magnetachse im magnetischen Meridian und senkrecht zu der Achse der Kupferhülse und der Drahtrollen liegt.

Durch einen unter dem Montierungsbrett liegenden Magnetstab läßt sich die Empfindlichkeit schwächen und verstärken, je nachdem die Richtkraft des Erdmagnetismus durch denselben vermehrt oder verringert wird.

Bei diesem Galvanometer kam der Magnet nach einigen Schwingungen, in 4 bis 6 Sekunden, zur Ruhe; es ließen sich daher auch veränderliche Ströme mit demselben beobachten. Für momentane, sogenannte ballistische, Ausschläge eignete es sich weniger, weil die Umkehr der Schwingungen rasch erfolgte.

Die Einstellung der Empfindlichkeit durch Verschiebung der Drahtrollen wurde bei späteren Instrumenten aufgegeben. Die elektrische Dämpfung durch Kupferkörper war bei diesem Instrumente sehr kräftig, und die Achse des Magnetes bedeutend kürzer als bei den Weberschen Spiegelgalvanometern; es zeigte sich also hier schon das Streben nach raschen und bald zur Ruhe kommenden Ausschlägen, welches von da an stets die Konstruktionen bestimmte.

Die elektrische Dämpfung war noch stärker und die magnetische Achse noch bedeutend kürzer bei den Spiegelgalvanometern von W. Siemens mit Glockenmagnet.

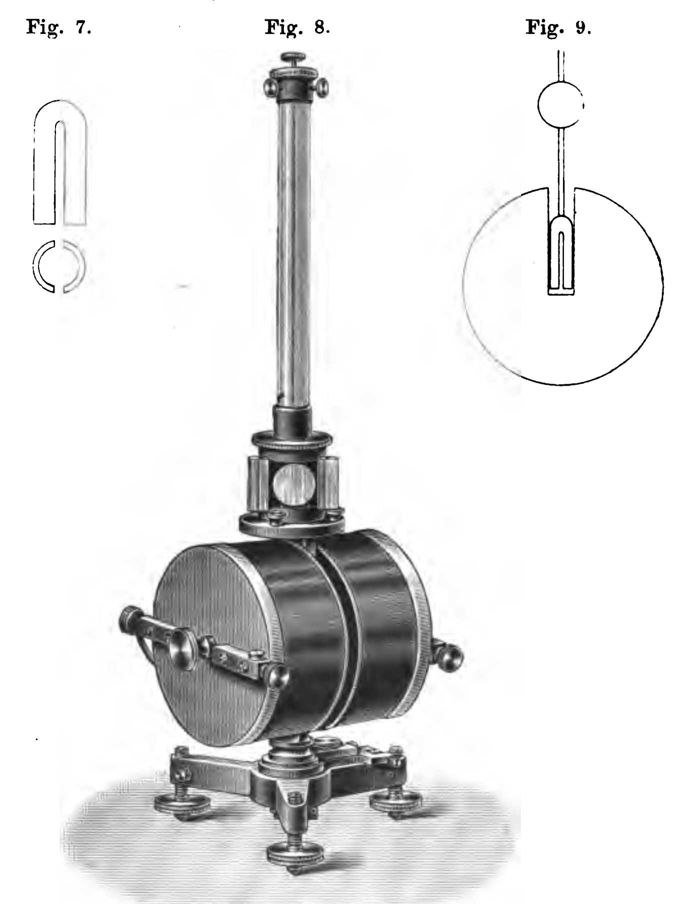
Dieser Magnet (s. Fig. 7) hat die Form eines aufgeschlitzten Fingerhutes oder eines zusammengebogenen Magnetstabes; die Pole befinden sich unten, die magnetische Achse ist daher kurz, bei den größten Exemplaren etwa 10 mm lang, die für die Stärke des Magnetismus bestimmende Länge des Magnetstabes jedoch verhältnismäßig groß, bis etwa 80 mm, die Oberfläche des Magnets zylindrisch, so daß dieselbe, wenn der Magnet in der zylindrischen Ausbohrung eines Kupferkörpers hing (s. Fig. 9), in allen Teilen sich nahe dem Kupfer befand. Die elektrische Dämpfung war infolgedessen auch so stark, daß der Magnet eines einfachen, mit demselben ausgerüsteten Spiegelgalvanometers, ohne Zuhilfenahme eines Richtmagnets, aperiodisch schwang.

Fig. 8 zeigt ein solches einfaches Spiegelgalvanometer, das sich namentlich zu Vorlesungsversuchen vorzüglich eignet, weil es die Lernenden nicht durch Schwingungen, die nicht von dem Strome herrühren, verwirrt und den Verlauf des Stromes beinahe genau richtig angibt.

Der Kupferkörper (s. Fig. 9) hat die Form einer Kugel mit einer zylindrischen Ausbohrung. Die Drahtrollen haben inwendig die Form von Halbkugeln und werden durch Schrauben auf der Kupferkugel befestigt. Diese letztere sitzt fest in einem Messingringe, welcher durch einen Zapfen drehbar in dem messingenen, stellbaren Dreifuße befestigt ist, und nach oben hin

die Spiegelkammer, das Glasrohr und einen Messingkopf trägt. Der Spiegel, aus dünnem Glase, von 25 mm Durchmesser, hängt in zwei Aluminiumgäbelchen und läßt sich durch Schräubchen senkrecht stellen; die Spiegelkammer wird mit einem Planglase

Fig. 7. Fig. 8. Fig. 9.



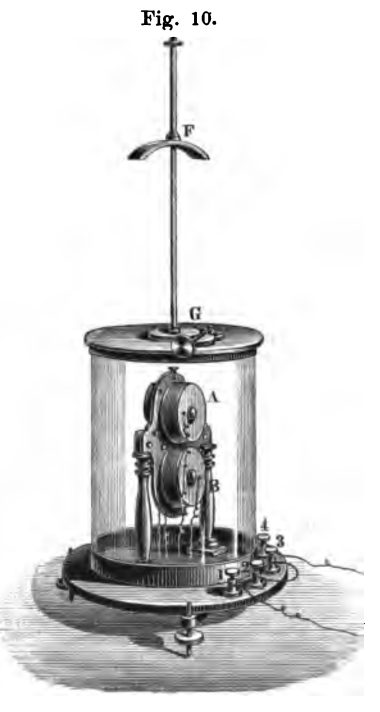
verschlossen; die Aufhängung des Fadens ist ähnlich, wie bei dem Wiedemannschen Instrument.

Die Empfindlichkeit ist bei den beiden eben beschriebenen Instrumenten von ähnlicher Größe, aber nach unseren heutigen

Begriffen gering, da die großen Kupferkörper den Windungen viel Platz wegnehmen und da nur ein einziges Rollenpaar und kein astatisches Magnetsystem angewendet ist.

Nach der Richtung der Empfindlichkeit hin wurde ein großer Fortschritt erzielt durch das Spiegelgalvanometer von Sir W. Thomson (Lord Kelvin); die Konstruktion desselben, ausgeführt von Elliott Brothers, wurde veranlaßt durch die in England in den sechziger Jahren aufblühende Fabrikation von langen Guttaperchakabeln, bei welcher die äußerste Sorgfalt auf die Herstellung der Isolierschicht verwendet werden mußte, und daher die elektrische Prüfung der letzteren ausschlaggebend war.

Fig. 10.



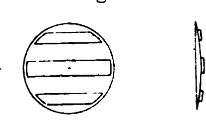
Dieses Instrument (siehe Fig. 10) besitzt ein astatisches Magnetsystem und zwei Rollenpaare, welche sich um die beiden Magnete lagern. Jeder Magnet ist kreisförmig, um sich möglichst an die Windungen anzuschließen, besteht aber nicht, wie bei dem Wiedemannschen Galvanometer, aus einer Stahlscheibe, sondern (siehe Fig. 11) aus mehreren dünnen, auf ein Glimmerblättchen aufgeklebten Stahlstäbchen, z. B. aus Uhrfederstahl; die Lage der magnetischen Achse ist auf diese Weise gesichert, die Homogenität des Stahls leichter erreichbar, und die Magnetisierung der einzelnen Stäbchen kann einzeln mit großer Sorgfalt erfolgen.

Die beiden mit Magnetchen von höchstens 10 mm Länge belegten Glimmerblättchen sind an ein entsprechend geformtes Aluminiumstäbchen gekittet, welches am oberen Ende eine Öse zur Befestigung des Aufhängefadens besitzt, am unteren Ende

einen langen Glimmerflügel trägt, der, bei Bewegung, Luft verdrängt und dadurch die Bewegung dämpft.

Es ist also Luftdämpfung, nicht elektrische, benutzt; dieselbe ist erheblich schwächer, als z. B. die elektrische bei den vorstehend beschriebenen Instrumenten, aber doch praktisch genügend, da man mit Hilfe eines astasierenden Richtmagnets beinahe Aperiodizität erzeugen kann. Beim gewöhnlichen Gebrauch macht das Magnetsystem einige Schwingungen, bevor es zur Ruhe kommt.

Fig. 11.



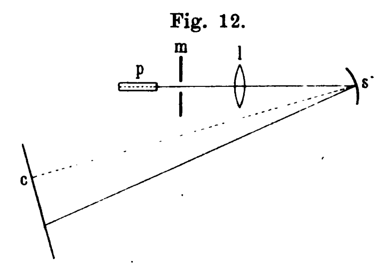
Auf das obere Glimmerblättchen ist ein Spiegelchen von derselben Größe gekittet; dasselbe ist leicht konkav.

Die vier Drahtrollen sind auf eine Messingplatte geschraubt, an welcher oben auch ein vertikales Messingstiftchen mit Reibung verschiebbar ist; der Kokonfaden wird an demselben befestigt, läßt sich also heben, senken und drehen.

Die Drahtrollen sind meist mit dünnstem Draht bewickelt und so geschaltet, daß ihre Wirkungen sich unterstützen; die Enden sind an Klemmen geführt.

Über das eigentliche Galvanometer wird ein viereckiger, mit einer planen Glaswand versehener Messingkasten gestülpt, welcher oben eine um sich selbst drehbare Stange mit dem gebogenen Richtmagnet trägt; der letztere läßt sich auf der Stange in vertikaler Richtung verschieben. Die Einstellung des Lichtbildes auf Null geschieht durch Drehung des Richtmagnets, die Einstellung der Empfindlichkeit durch vertikale Verschiebung desselben.

Fig. 12.

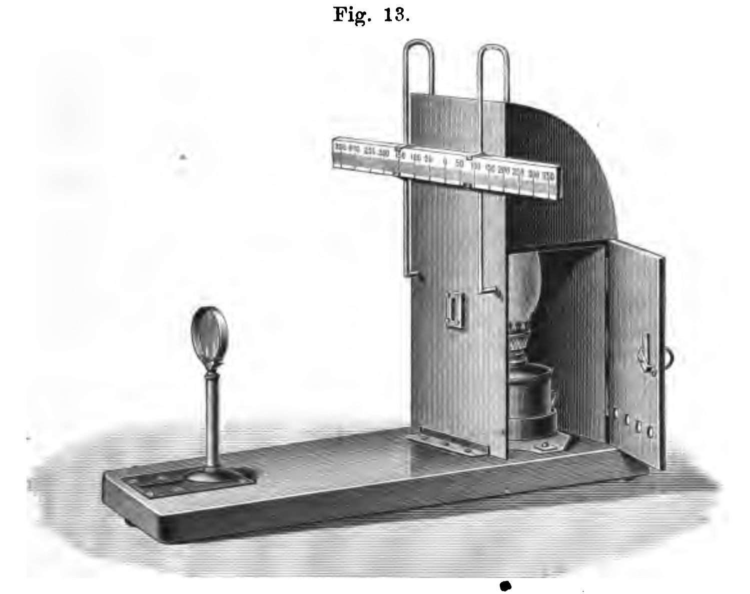


Die Spiegelablesung, welche vorher stets mit Fernrohr und heller Skala eingerichtet war, ist bei diesem Instrumente (s. Fig. 12) eine objektive, d. h. das Fernrohr ist ersetzt durch eine schmale Flamme p, hinter dem Spalt des Bleches m und der Linse l, deren Bild, nach Reflexion auf dem Spiegel s, auf der dunkel gehaltenen Skala c erscheint. Für größere Genauigkeit benutzt man einen beleuchteten Spalt, in dessen Mitte ein Faden ausgespannt ist, so

daß man auf der Skala ein helles Viereck mit dunklem Strich sieht. Diese Abänderung, welche bald sich allgemein einführte, war veranlaßt durch die Messungen der Kabelisolation, für welche das Instrument hauptsächlich bestimmt war, weil bei derselben häufig mehrere Personen gleichzeitig die Bewegung des Bildes auf der Skala verfolgen müssen, und weil das Sehen durch das Fernrohr die Beobachter rasch ermüdet.

Wie Fig. 13 zeigt, sind Lampe, ein dieselbe umgebender Blechkasten, Spalt und die verschiebbare Skala, von etwa 40 cm

Fig. 13.



Länge, vereinigt. Die Skala ist in Teilstriche von etwa $^1/_3$ mm Abstand geteilt.

Die Genauigkeit der Ablesung ist bei diesem Instrumente bedeutend geringer als bei der Fernrohrablesung, indessen für die Verwendung bei Isolations- und Brückenmessungen völlig ausreichend.

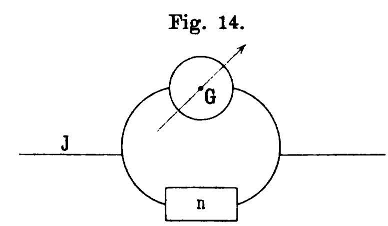
Dieses Galvanometer trat infolge seiner mannigfachen Vorzüge etwa Anfang der siebziger Jahre des vorigen Jahrhunderts in ziemlich allgemeinen Gebrauch; in neuester Zeit fangen die

nachstehend beschriebenen Konstruktionen an, dasselbe zu verdrängen.

Eine Einrichtung, welche W. Thomson bei seinem Spiegelgalvanometer einführte und welche allgemein angenommen wurde, ist das Abstimmen der Empfindlichkeit durch Nebenschlußwiderstände.

Die Mittel, mit denen man vorher die Empfindlichkeit veränderte, das Entfernen und Nähern der Drahtrollen und des Richtmagnets, mußten naturgemäß verschwinden, sobald die justierten Widerstandsskalen in Gebrauch kamen; denn durch die letzteren war es möglich geworden, die Empfindlichkeit in genau durch die Widerstandsverhältnisse gegebener Weise, ohne Messung, zu verändern.

Fig. 14.



W. Thomson führte hierfür dekadische Verhältnisse ein. Wenn g der Widerstand des Galvanometers, n derjenige des Nebenschlusses (s. Fig. 14), J der Hauptstrom, so ist der Strom im Galvanometer

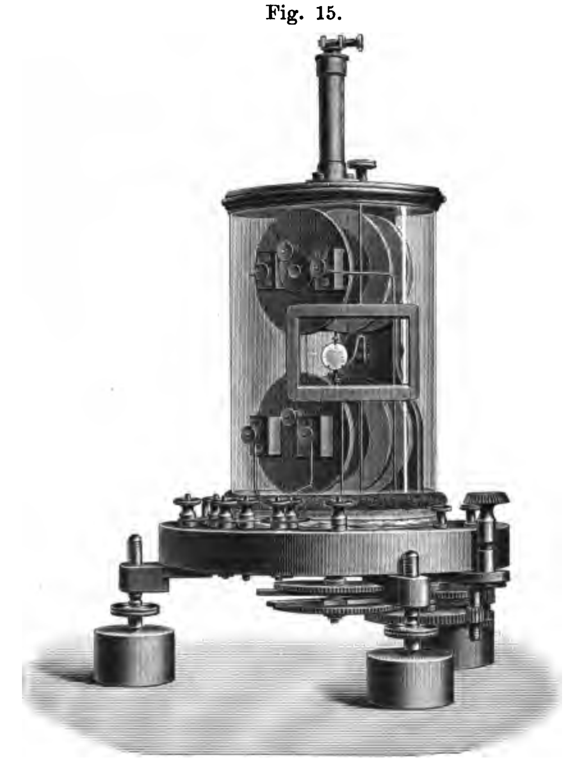
$$i_g = J \frac{n}{n+g} = J \frac{1}{1+\frac{g}{n}};$$

wenn also $\frac{g}{n} = \frac{1}{9}, \frac{1}{99}, \frac{1}{999}$ usw. gewählt wird, so ist das Verhältnis des Galvanometerstromes zum Hauptstrom bzw. $\frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1000}$ usw.; wenn also die Empfindlichkeit in irgend einem Maß für einen dieser Nebenschlüsse bekannt ist, so ist sie auch für alle anderen Nebenschlüsse, und für den Fall ohne Nebenschluß, bekannt.

Man vereinigt nun diese Nebenschlüsse in einem Widerstandskasten, welcher gestattet, durch bloße Stöpselung die Empfindlichkeit in bestimmter Weise zu verändern. Allerdings ist, da der Widerstand des Galvanometers nicht justiert wird, für jedes Galvanometer ein zugehöriger Nebenschlußwiderstandskasten nötig.

Das Siemenssche Spiegelgalvanometer mit Glockenmagnet wurde nach dem Auftreten des Thomsonschen ebenfalls astatisch gemacht mit zwei Rollenpaaren und zwei kleinen Glockenmagneten; Fig. 15 zeigt dasselbe. Der plane Spiegel sitzt in der Mitte, also dem ruhigsten Punkte des beweglichen Systems; die Dämpfung ist elektrisch, indem kleine Kupfer-

Fig. 15.

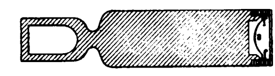


dämpfer die Magnete umgeben; das bewegliche System ist erheblich schwerer, aber auch solider als bei dem Thomsonschen Instrument; die Empfindlichkeit ist etwa dieselbe. Den Richtmagnet bilden zwei schwach magnetisierte Stäbe, welche unter dem Grundbrett angebracht sind und durch ein Räderwerk, mittels eines drehbaren Messingknopfes, entweder bei gleichbleibender Kreuzung gedreht, oder, nach einem Druck

auf den Knopf, anders gekreuzt werden können; die Kreuzung ersetzt die vertikale Verschiebung des Richtmagnets des Thomsonschen Instruments.

Ein ganz anderes Bild zeigt (s. Fig. 16) der „Mirror“ von Sir W. Thomson, der nur zur Kabeltelegraphie benutzt wird und den telegraphischen Zeichen mit äußerster Schnelligkeit folgen muß. Das Magnetsystem mit Spiegel *s* ist an ganz kurzen kräftigen Fäden *ff* oben und unten vor einer Messing- oder Kupferfläche aufgehängt und befindet sich vorn an einem zylindrischen Metallkörper mit Handhabe, der in die Galvanometerrolle eingeschoben wird. Die Justierung der zweckmäßigsten, keineswegs aperiodischen Schwingungsart geschieht durch den Richtmagnet.

Fig. 16.



Die Verkürzung der Magnete und die Leichtigkeit des beweglichen Systems wurden in neuerer Zeit bis zu den äußersten Grenzen getrieben; es wurden erheblich größere Empfindlichkeiten erzielt, freilich auf Kosten der Festigkeit der Ruhelage und der anwendbaren Entfernung der Skala vom Spiegel.

Du Bois und Rubens [1]) gingen von der Thomsonschen Konstruktion aus, verstärkten die Luftdämpfung, indem sie hinter den Magnetscheibchen verstellbare Messingflächen anbrachten, durch deren Annäherung die Dämpfung sich einstellen ließ, benutzten die von Vernon Boys eingeführten Quarzfäden zur Aufhängung, stellten Magnetsysteme von wachsender Leichtigkeit her und beschäftigten sich mit den Vorschriften der Justierung.

Für drei Magnetsysteme von bzw. 1400 bis 1500 mg, 200 bis 250 mg, 100 bis 125 mg Gewicht erwies sich nur das schwerste als für momentane (ballistische) Ausschläge brauchbar; bei dem leichteren System erfolgt hierfür die Umkehr der Schwingungen zu rasch. Die Empfindlichkeiten für dauernde Ablenkung verhielten sich bei den drei Systemen wie die Zahlen 68, 209, 785; die Empfindlichkeit des mittleren Systems entsprach ungefähr derjenigen des Spiegelgalvanometers von Elliott Brothers (W. Thomson). Mit der Empfindlichkeit für Ströme wuchs aber auch diejenige für äußere Störungen durch Bodenerschütterungen, vorbeifahrende Tramwagen, vagabundierende Erdströme usw.; in

[1]) Wied. Ann. **48**, 336 (1893).

dem mitten in Berlin befindlichen physikalischen Institut der Universität konnte mit dem leichtesten System nur abends mit Sicherheit gearbeitet werden.

Paschen[1]) benutzt Magnetchen von nur 1 bis 1,5 mm Länge, Vernon Boys ein Magnetsystem von nur 2 mg Gewicht.

Quarzfäden, die in neuerer Zeit vielfach benutzt werden, sind noch erheblich dünner als Kokonfäden; ihre Anwendung fördert daher auch die Empfindlichkeit.

Bei diesen feinsten Instrumenten hängt viel von der Gleichheit der Magnetisierung der beiden eine astatische Nadel bildenden Magnetsysteme ab, welche bei den vorstehend beschriebenen Konstruktionen schwer zu erreichen ist.

Hartmann und Braun[2]) erleichtern diese Justierung in origineller Weise dadurch, daß sie nicht horizontale, sondern zwei nebeneinander liegende, vertikale Magnete benutzen. Man kann z. B. eine Drahtrolle auf drei Polpaare $n_0 s_0'$, $S N'$, $n_u s_u'$ (Fig. 17) wirken lassen, indem man zwei Magnetstäbchen $n_0 S n_u$, $s_0' N' s_u'$ so magnetisiert, daß in der Mitte je ein magnetischer Folgepunkt (S, N'), unten und oben gleichnamige Pole ($n_0\, n_u$, $s_0'\, s_u'$) sich bilden; jedes Stäbchen ersetzt alsdann zwei mit demselben Pole aneinander stoßende Stäbchen.

Es ist dann stets für den Magnetismus der Pole

$$S = -n_o - n_u \qquad \text{und} \qquad N' = -s_o' - s_u';$$

wenn dann auch die Magnetismen der beiden Röhrchen nicht genau gleich sind, so ist doch genau das magnetische Moment $N'S$ gleich der Summe der Momente $n_o s_o' + n_u s_u'$; es kann also eine hohe, recht feste Astasie erzielt werden.

Fig. 17.

Solche astatische Nadeln benutzten später, in möglichst leichter Ausführung, Weiß und Broca.

In neuerer Zeit, gerade während wissenschaftliche Fortschritte die möglichste Steigerung der Empfindlichkeit veranlaßten, stellten sich durch die Einbürgerung der Elektrotechnik in Straßen und Häusern diesen Beobachtungen immer größere Hindernisse entgegen in den magnetischen und elektrischen Störungen, nament-

[1]) Wied. Ann. 48, 279 (1893).

[2]) Zentralbl. f. Elektrotechnik 1889, S. 181. Bruger.

lich durch die elektrischen Straßenbahnen, die in manchen Fällen genaue Beobachtungen gar nicht zuließen.

Um dagegen ein Spiegelgalvanometer zu schützen, umgab F. Braun (Ausführung durch Hartmann und Braun) dasselbe, in der Ebene der Magnetnadel, mit einem horizontalen Ring aus weichem Eisen; du Bois konstruierte Panzergalvanometer (Ausführung durch Siemens und Halske), die ganz von einer Eisenkonstruktion umhüllt waren.

Diese Konstruktionen sind jedoch auf Sir W. Thomson zurückzuführen, welcher bereits 1858 Spiegelgalvanometer an Bord eines elektrische Kabel legenden Schiffes mit starken Hüllen aus weichem Eisen umgab, zum Schutz gegen ähnliche Störungen.

Durch solche Eisenhüllen wird die Wirkung jener Störungen zwar verringert, aber nicht gänzlich aufgehoben.

Spiegelgalvanometer mit Drehspule. In neuester Zeit beginnt sich ein prinzipiell von den vorstehenden verschiedenes System von Spiegelgalvanometern einzubürgern, nämlich das System Deprez-d'Arsonval, auch Drehspulgalvanometer genannt.

Dasselbe beruht auf dem sog. Thomsonschen Rähmchen, d. h. auf der im magnetischen Felde beweglichen Drehspule, welche Sir W. Thomson (Lord Kelvin) in dem Syphon Recorder, einem für die Telegraphie auf atlantischen Kabeln konstruierten Instrument, angewendet hat, und welche sich in neuester Zeit in allen Zweigen der elektrischen Meßtechnik, in denen es verwendbar ist, eingeführt hat.

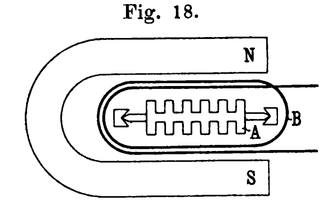
Der Entwickelungsprozeß dieses Instrumentes ist ein eigentümlicher, indem die Beziehung zu dem Thomsonschen Apparat erst zur Kenntnis der Konstrukteure kam, als dieser Prozeß im wesentlichen beendet war und auf dieselbe Form geführt hatte, welche Thomson lange vorher gewählt hatte. Es liegt dies wahrscheinlich daran, daß zwischen den Kreisen der Kabelelektriker, welche das Thomsonsche Instrument anwendeten, und der Maschinenelektriker nur ein geringer Zusammenhang herrschte.

1880 gab M. Deprez ein einfaches Instrument, mit direkter Ablesung, an, welches zu Maschinenmessungen bestimmt war und namentlich den Zweck verfolgte, die Angaben von dem Erdmagnetismus und den magnetischen Störungen durch elektrische

Maschinen, starke Ströme, große Eisenkörper usw. unabhängig zu machen.

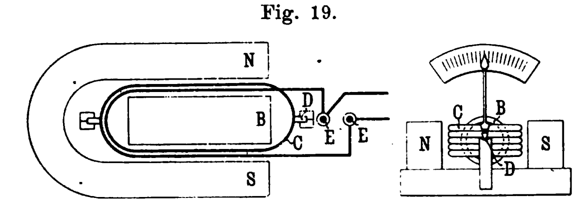
Zwischen den Schenkeln eines kräftigen Hufeisenmagnets *NS* (s. Fig. 18) war ein längliches, kammartig geformtes Eisenblech *A*, zwischen Spitzen drehbar, aufgestellt und wurde aus seiner natürlichen, der Verbindungslinie der Pole entsprechenden Ruhelage durch die Wirkung einer vom Strome durchflossenen, festen Drahtwickelung *B* abgelenkt. Deprez nannte dieses Instrument „Fischgrätengalvanometer“, da die Form des Eisenblechs mit dem Rückgrat eines Fisches Ähnlichkeit zeigt. Bei diesem Instrument war natürlich die Empfindlichkeit sehr gering, und die Skala sehr ungleich.

Fig. 18.



Um die Hauptmängel dieses Instrumentes, die starke Richtkraft, zu beseitigen, schlug d'Arsonval 1881 [1]) vor, statt des Eisenkernes die Drahtspule beweglich zu machen oder, wie Deprez sich ausdrückt, den beweglichen Teil „astatisch“ zu machen, und den Strom durch Quecksilbernäpfe zuzuführen. Deprez sah alsdann, daß die bisherige Form des Eisenkernes für diese Anordnung nicht mehr passe, und ersetzte denselben durch ein Eisenrohr. So entstand das Galvanometer Deprez-d'Arsonval für direkte Ablesung (Drehspulgalvanometer) (s. Fig. 19).

Fig. 19.



Das feststehende Eisenrohr *B* liegt der ganzen Länge nach zwischen den Schenkeln des Hufeisenmagnets *NS*; die zwischen Spitzen *D* bewegliche Drahtspule *C* umspielt dasselbe, während der an der Spule sitzende vertikale Zeiger über einer in vertikaler Ebene

[1]) Lumière électr. 4, 309 (1881).

befindlichen Skala sich bewegt. *EE* sind die Quecksilbernäpfe, aus welchen der Strom in die Enden der Drahtspule gelangt.

Wenn Strom durch die Spule fließt, so wird, solange dieselbe in dem magnetischen Felde sich befindet, eine dem Strome beinahe genau proportionale Richtkraft ausgeübt; wenn also eine an der Spule proportional der Ablenkung entgegenwirkende Torsionsfeder angebracht ist, so wird die Skala im wesentlichen proportional. Dieser Vorzug war also gleichzeitig mit der von Deprez angestrebten Unabhängigkeit des Instrumentes von magnetischen und elektrischen Störungen erreicht, und eine für Schalttafeln elektrischer Anlagen passende Kombination gefunden.

Man war also auf einem anderen Wege zu derjenigen magnetelektrischen Kombination gelangt, welche Sir W. Thomson seinem Syphon Recorder zugrunde gelegt hatte.

d'Arsonval suchte diese Konstruktion für seine Wissenschaft, die Physiologie, zu benutzen und konstruierte 1889 [1]) das in Fig. 20 angedeutete Spiegelgalvanometer.

d'Arsonval hatte als Aufhängung solcher Instrumente vorher eine bifilare benutzt, d. h. die Spule an zwei dicht nebeneinander liegenden Drähten, die zugleich die Stromleitungen bildeten, aufgehängt. Diese Anordnung war für seine Zwecke nicht empfindlich genug und hatte außerdem den Fehler, daß in einem von Erschütterungen nicht freien Lokale das Bild stark schwankte. Er hängte daher die Spule nur an einem, mit dem einen Spulenende verbundenen, feinen Draht auf, und führte den anderen Draht nach unten an ein verstellbares Häkchen oder in ein Quecksilbernäpfchen. Hierdurch war sowohl die Empfindlichkeit erhöht als die nötige Stabilität gewonnen.

Fig. 20.



[1]) Lumière électr. 32, 268 (1889).

In einer anderen, für direkte Ablesung bestimmten Konstruktion (s. Fig. 21) war nur ein einziges magnetisches Feld angewendet, in dem die Hälfte der Spule sich bewegte. An jedem Pole des Hufeisenmagnets *mm* saß ein rohrförmiger, eiserner Polschuh *pp*, so daß der ringförmige Raum zwischen den Polschuhen ein ausgedehntes, gleichmäßiges, magnetisches Feld bildete. Der

Fig. 21.

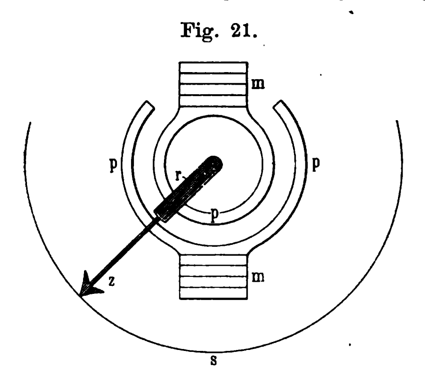
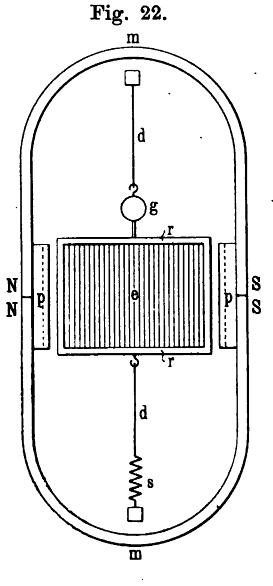
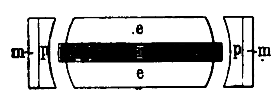


Fig. 22.





eine vertikale Schenkel der Spule *r* befand sich in der Mitte längs der Drehachse, der andere im magnetischen Felde; der neigende Einfluß des Spulengewichtes war durch ein Gegengewicht kompensiert.

Eine für ballistische Beobachtung bestimmte Konstruktion des d'Arsonval schen Spiegelgalvanometers zeigt Fig. 22 in der Ansicht und im Durchschnitt.

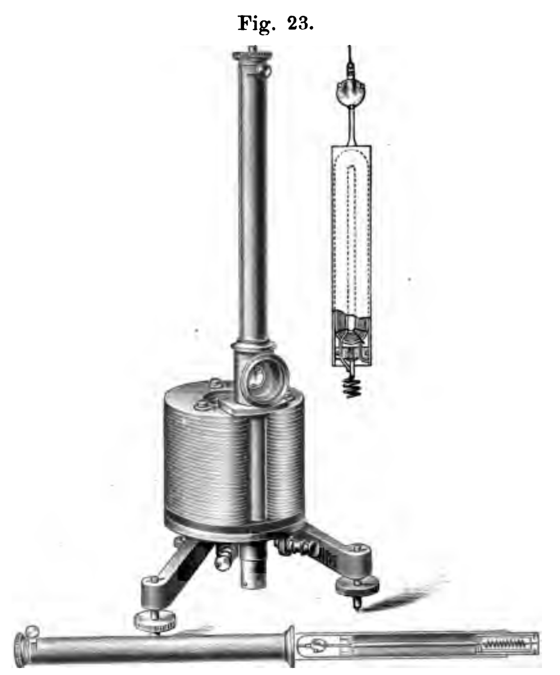
Zwei mit den gleichnamigen Polen (*N*, *S*) aufeinanderstoßende Hufeisenmagnete, zwischen denen der feste Eisenkern *e* liegt, bilden die zwei magnetischen Felder, in denen sich die beiden vertikalen Schenkel der Spule *r* bewegen. Nach oben und unten führen feine Silberdrähte *dd*, *s* ist eine Drahtspirale, *pp* sind die Polschuhe des Magnetsystems.

Das Trägheitsmoment der beweglichen Spule ist bei dieser Konstruktion bedeutend größer als bei der vorigen, um eine längere Schwingungsdauer und leichtere Ablesung des Umkehr-

punktes bei den Schwingungen des beweglichen Systems zu erlangen.

In der durch diese Konstruktionen vorgezeichneten Richtung bewegten sich nun im wesentlichen alle folgenden Konstruktionen der Spiegelgalvanometer dieses Systems. Die hierbei zu überwindenden mechanischen Schwierigkeiten waren gänzlich verschieden von denjenigen der früheren Systeme; die Durchbildung dieser Spiegelgalvanometer erforderte daher verhältnismäßig lange

Fig. 23.



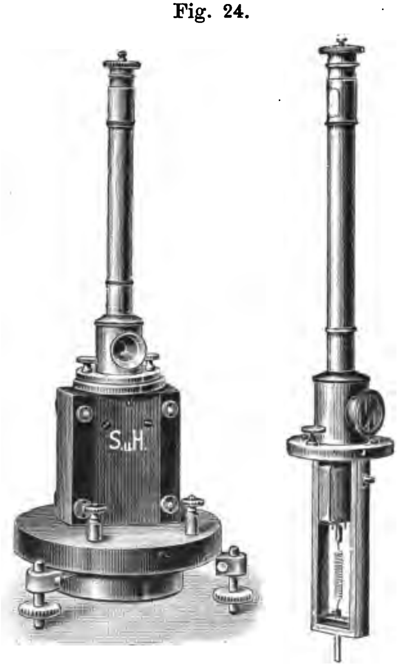
Zeit. Wir beschreiben zunächst einige neuere Konstruktionen und besprechen alsdann die Eigentümlichkeiten dieser Instrumente.

1891 wurde von Edelmann und später von Queen die in der Fig. 23 dargestellte Konstruktion ausgeführt.

Das Magnetsystem besteht aus vielen aufeinandergelegten und verschraubten platten Stahlplatten. Zwischen den Polen befindet sich kein Eisenkern, sondern nur die bewegliche längliche Spule, welche oben einen Spiegel trägt und an einem dünnen,

plattgedrückten Drähtchen aus Phosphorbronze aufgehängt ist; nach unten führt von der Spule eine Spiralfeder nach einem Klemmchen. Die Spule sitzt im Inneren eines Aluminiumrohres; das ganze bewegliche System: oberer Fixpunkt, Aufhängedraht, Spiegel, Spule mit Aluminiumrohr, Spiralfeder und unterer Fixpunkt, stecken in einem Messingrohr, um welches das Spiegelhaus sich legt, und an dessen unteres Ende sich das die Spiralfeder umschließende Hartgummirohr schließt; dieses Rohr mit dem beweglichen System läßt sich zwischen die Polflächen einschieben, auch leicht wieder herausziehen und durch ein anderes Rohr mit einem anderen beweglichen System ersetzen, wie aus der Figur ersichtlich.

Fig. 24.



Über die Schwingungen dieses Instrumentes wurden Kurven aufgenommen, welche zeigen, daß die Beruhigungszeit 8 bis 12 Sekunden beträgt und die Bewegung im wesentlichen eine aperiodische ist.

Die in neuerer Zeit von Carpentier ausgeführten Konstruktionen sind im wesentlichen Fortbildungen der d'Arsonvalschen Konstruktion.

Eine kompendiösere, praktischere Konstruktion ist diejenige von Siemens und Halske[1]) (s. Fig. 24), in welcher, wie in der Edelmannschen, beinahe alle Glasteile vermieden sind. Das Magnetsystem ist zum metallenen Kasten ausgebildet, in welchem das bewegliche System mit festem, rohrförmigem Eisenkern, Spiegelhaus, unterer und oberer Aufhängung, eingeschoben

[1]) H. Sack, Elektrotechn. Zeitschr. 1896, S. 597.

und durch ein anderes verschiedener Art leicht ersetzt werden kann. Die obere Aufhängung bildet ein dünnes Band, die untere eine feine Spiralfeder, beide aus Phosphorbronze. Für ballistische Ausschläge dient ein bewegliches System, bei welchem die Spule zur Vergrößerung des Trägheitsmomentes mit Gewichtchen belastet ist.

Die hervorragendste Eigentümlichkeit dieser Spiegelgalvanometer mit Drehspule und der Grund, weshalb sie sich so allgemein einführen, ist die Konstanz der Empfindlichkeit und die Unabhängigkeit vom Erdmagnetismus und magnetischen und elektrischen Störungen aller Art.

Alle früheren Spiegelgalvanometer, namentlich die astatischen, litten an dem Übelstand, daß nicht nur bei jedem Transport des Instrumentes und bei jeder Veränderung des Richtmagnetes, sondern wegen der Veränderung des Erdmagnetismus regelmäßig stündlich oder noch öfter die Empfindlichkeit bestimmt und eventuell eingestellt werden mußte. Die Empfindlichkeit der Spiegelgalvanometer mit beweglicher Spule dagegen hängt beinahe nur von der Stärke des Magnetsystems ab, und die Konstanz derselben ist durch die Erfahrungen der Fabrikanten durch besondere Behandlung der Magnete beinahe völlig gesichert.

Für jeden Beobachter bildet es eine große Erleichterung, der Empfindlichkeitsbestimmungen beinahe ganz überhoben zu sein.

Auch die Unabhängigkeit von äußeren magnetischen oder elektrischen Störungen beruht auf der Anwendung eines kräftigen Magnetfeldes; denn dasselbe überwiegt bei weitem jene störenden Kräfte. Dieser Schutz ist stärker und sicherer, als bei den älteren Spiegelgalvanometern derjenige durch einen umgebenden Eisenkörper.

Eine Eigentümlichkeit dieser Instrumente, welche von Vorteil, oft aber auch von Nachteil sein kann, ist die starke elektrische Dämpfung. Während bei den älteren Spiegelgalvanometern es nicht leicht war, eine den heutigen Ansprüchen genügende Dämpfung zu erzielen, und hierdurch stets konstruktive Nachteile entstanden, ist es umgekehrt bei diesen Instrumenten nicht leicht, die dem System gleichsam innewohnende starke Dämpfung soweit herabzumindern, daß die Genauigkeit und Raschheit der Beobachtung nicht darunter leidet; sehr leicht tritt nämlich bei diesen Instrumenten der überaperiodische Zustand oder das langsame

„Kriechen“ des Bildes nach der Gleichgewichtslage ein, welches die Geduld des Beobachters auf eine harte Probe stellt. Dieses Kriechen kann schon eintreten, wenn die Spule auf ein, einen geschlossenen Leitungskreis bildendes dünnes Kupfer- oder Aluminiumblech gewickelt ist; wenn man aber diesen Leitungskreis aufschneidet, so daß nur die durch äußere Widerstände geschlossene Spule selbst für die Dämpfung in Betracht kommt, so wird die Dämpfung abhängig von diesen äußeren Widerständen, ist also bei jeder Anordnung der Messung eine andere.

Diese Schwierigkeit zu besiegen oder zu mildern, ist auf verschiedene Arten gelungen, deren Erörterung uns hier zu weit führen würde.

c) Galvanometer mit direkter Ablesung und absoluten Angaben.

Neben der Fortbildung der Spiegelgalvanometer, bei welchen die Ablenkung eine kleine war und innerhalb dieses Bereichs die Stromstärke proportional der Ablenkung gesetzt werden durfte, ging die Entwickelung anderer Strommeßinstrumente mit Magneten einher, deren Meßprinzip bei richtiger Behandlung ebenfalls Anspruch auf Genauigkeit machen konnte.

Diese Entwickelung wäre kaum notwendig gewesen, wenn die Versuche, ein mit größeren Ablenkungen arbeitendes Galvanometer genau zu graduieren, ein praktisch befriedigendes Resultat gehabt hätten. Heutzutage, wo wir Skalen von genau abgeglichenen Widerständen besitzen und bestimmte Stromverhältnisse leicht herstellen können, kann diese Graduierung mit Sicherheit ausgeführt werden; bevor man jedoch diese Mittel besaß, war die Graduierung schwierig und ungenau und konnte sich daher nicht recht einbürgern.

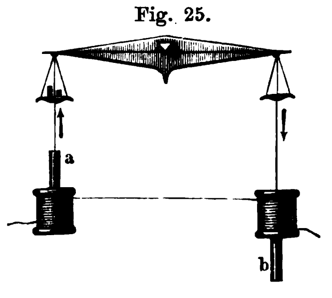
Elektromagnetische Wage. Da die Anziehungskraft, welche eine Stromrolle auf einen Magnet ausübt, bekannt war, dachte man bald an die Konstruktion einer elektromagnetischen Wage; Becquerel[1]) gab zuerst eine solche an, Lenz und Jakobi[2]) verbesserten dieselbe wesentlich.

---

[1]) Pogg. Ann. **42**, 307 (1837).
[2]) Ebend. **47**, 226 ff. (1839).

Man hängte z. B. unter den beiden Schalen einer feinen Wage die Magnete *a* und *b* auf, den einen (*a*) in kurzem Abstand über einer Stromrolle und den anderen (*b*) unter einer zweiten gleichen Stromrolle; die Richtung des Stromes, welcher beide Rollen hintereinander durchfloß, und die Verbindung der beiden Rollen wurde so gewählt, daß jeder Magnet von der bzw. Stromrolle abgestoßen wurde und die Wirkung durch Auflegen von Gewicht auf die eine Wagschale kompensiert werden konnte. Man konnte also die Wirkung von Stromrollen auf Magnete unter bestimmten Verhältnissen durch Gewichte ausdrücken und erhielt für steigenden Strom steigende Gewichte.

Fig. 25.



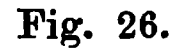
Wäre nun von vornherein durch die Theorie des Vorganges gegeben gewesen, in welcher Weise die Gewichte mit den Stromstärken steigen müssen, so hätte das Instrument eine einfache, sichere Anwendung gestattet. Da aber infolge der Rückwirkung des Stromes auf den Magnetismus der Magnete die Gewichte schwächer ansteigen als die Ströme, und die Art des Ansteigens experimentell bestimmt werden muß, so stand man wieder, wie bei den Galvanometern mit größeren Ablenkungen, vor der Schwierigkeit der Graduierung; diese Wage besaß also keinen Vorzug vor jenen Galvanometern und führte sich auch in der Folge nicht ein.

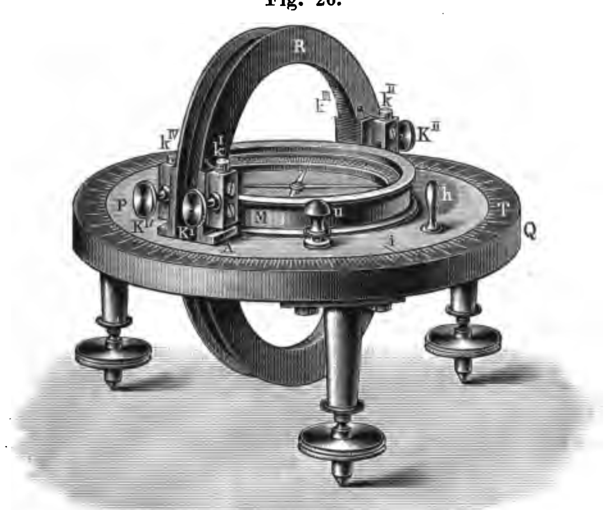
Sinusbussole. Die Graduierung fiel jedoch weg bei der sogenannten Sinusbussole, bei welcher die Drehung der Magnetnadel ersetzt wird durch Drehung der Wickelung.

Bei dieser Methode dreht man die Wickelung, welche um dieselbe vertikale Achse drehbar gemacht wird, wie die Magnetnadel, der Magnetnadel nach, wenn dieselbe durch den Strom der Wickelung abgelenkt ist, und zwar so lange, bis wieder die Drähte der Wickelung parallel der magnetischen Achse der Nadel sind; bei verschiedenen Stromstärken bleibt also die Lage der Nadel zu den Stromwindungen gleich, aber beide sind um einen Winkel α aus der stromlosen Lage gedreht worden. Da nun im Gleichgewichte die Wirkung der Stromwindungen auf die Nadel gleich

derjenigen des Erdmagnetismus auf die Nadel sein muß und die letztere proportional *sin* α, so ist auch die angewandte Stromstärke proportional *sin* α — daher der Name Sinusbussole.

Das Verhältnis von verschiedenen, durch das Instrument geschickten Strömen ist also von vornherein gegeben durch den Sinus des Drehungswinkels, und die Graduierung fällt fort.


Fig. 26.



Die Sinusbussole rührt von Pouillet[1]) her; Poggendorff[2]) verbesserte dieselbe wesentlich. Fig. 26 stellt dieselbe in der Form dar, welche ihr von Siemens u. Halske gegeben und Sinustangentenbussole genannt wurde, weil sie auch zur Strommessung nach der nachstehend beschriebenen Tangentenmethode verwendet werden konnte.

Tangentenbussole. Dasjenige Meßinstrument, welches noch heutzutage gebraucht wird, während die vorstehend beschriebenen außer Gebrauch geraten sind, und bei welchem nicht nur die Graduierung wegfällt, sondern auch eine Bestimmung in absolutem Maße ermöglicht wird, ist die Tangentenbussole, welche ebenfalls von Pouillet herrührt.

---

[1]) Pouillet, Compt. rend. **4**, 267 (1837); Pogg. Ann. **42**, 284.
[2]) Pogg. Ann. **50**, 504 (1840); **57**, 86 (1842).

Bei diesem Instrumente hat die Wickelung nicht die plattgedrückte, die Nadel möglichst nahe umgebende Form, wie sonst bei Galvanometern, sondern diejenige eines in senkrechter Ebene aufgestellten kreisförmigen Bandes, dessen Mitte den Punkt bildet, um welchen die Magnetnadel in horizontaler Ebene schwingt, wobei ihre Ablenkungen an einer Kreisteilung abgelesen werden. Die Theorie dieses Instrumentes läßt sich exakt durchführen;

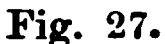
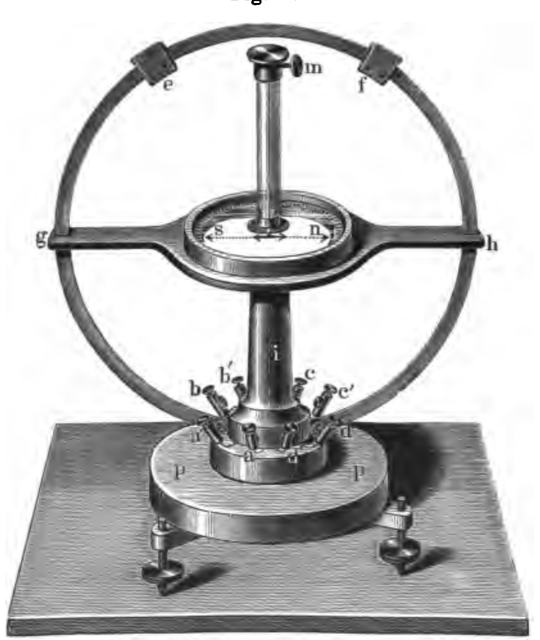


Fig. 27.



wenn die Intensität des Erdmagnetismus und die Dimensionen des Wickelungsringes nebst der Anzahl und Lage der Windungen bekannt sind, so läßt sich nicht nur, wie bei der Sinusbussole, das Verhältnis verschiedener Ströme, die verschiedenen Winkeln entsprechen, angeben, sondern auch für jede einzelne Messung die Stromstärke in dem später zu besprechenden absoluten Maß.

Die ursprüngliche Form derselben zeigt Fig. 27. ***gefh*** ist eine aus Messing gebildete Rinne, in welcher die Windungen liegen;

aa', *bb'*, *cc'*, *dd'* sind ihre an Klemmen geführten Enden, so daß einzelne oder mehrere derselben eingeschaltet werden können. Die Nadel *ns* ist an einem Kokonfaden aufgehängt, der über die Schraube *m* geführt ist und dadurch in die richtige Höhe gebracht werden kann, so daß die Nadel über der umgebenden Kreisteilung spielt. An dem Grundbrett *PP* sitzen drei Stellschrauben, mittels welcher der Mittelpunkt der Nadel in den Mittelpunkt des Kreises gebracht werden kann; die Nadel ist in einer mit Glas bedeckten messingenen Dose eingeschlossen, daher vor Luftzug geschützt. Durch Drehung des ganzen Instrumentes wird die Nadel auf Null gestellt; dann liegen Nadel und Stromwindungen im magnetischen Meridian.

Um einen Strom zu messen, wird derselbe durch eine oder mehrere Windungen geschickt und die Ablenkung der Nadel gemessen. Die Messung ist, wie bei allen Galvanometern mit einfacher Nadel und ohne mechanische Richtkraft, unabhängig von dem magnetischen Moment der Nadel; kennt man die horizontale Intensität des Erdmagnetismus für den betreffenden Ort, und hat man den Reduktionsfaktor R aus den Dimensionen berechnet, so ist die gesuchte Stromstärke J unmittelbar in absolutem Maß, wenigstens in erster Annäherung und für nicht zu große Ablenkungen: $J = R \cdot tg\,\varphi$. Die Länge der Nadel muß klein sein im Verhältnis zum Durchmesser des Windungskreises.

Der Fehler, der in dieser einfachen Formel liegt und nicht unbedeutend ist, rührt davon her, daß die Wirkung des oder der Kreisströme auf den Magnet nicht proportional $\cos\varphi$, sondern einer Reihe ist, deren erstes Glied $\cos\varphi$ enthält, deren folgende Glieder aber um so bedeutender ins Gewicht fallen, je größer die Ablenkung φ ist. Um die höheren Glieder der Reihe in Wegfall zu bringen und die Messung dadurch genauer zu machen, hat die Tangentenbussole verschiedene Verbesserungen erfahren.

Helmholtz [1]) und Gaugain [2]) legen zu diesem Zwecke die Windungen in zwei kegelförmig gestaltete, zu beiden Seiten der Mittelebene angebrachte Rinnen, wobei der Mittelpunkt der Kegel in den Drehpunkt der Nadel fällt; der Winkel der Kegel muß ein

---

[1]) Helmholtz, Sitzung der physikalischen Gesellschaft zu Berlin am 16. März 1849.

[2]) Gaugain, Compt. rend. **36**, 191 (1853); Pogg. Ann. **88**, 442.

ganz bestimmter sein, damit das zweite Glied der oben erwähnten Reihe fortfällt.

Auf diese Art können, wie seinerzeit F. Neumann in seinem Seminar zu Königsberg zeigte, beliebig viele Glieder der Reihe weggeschafft und die Tangentenformel zur strengen Geltung gebracht werden, wenn man zu beiden Seiten der Nadel nicht nur je eine Windungsrinne, sondern eine ganze Anzahl Windungsrinnen von gleicher Größe in bestimmten Abständen anordnet.

Fig. 28.



Eine genauere Konstruktion der einfachen Tangentenbussole mit zentralem Ring gab F. Kohlrausch[1]).

Eine andere Lösung dieser Aufgabe hat Riecke[2]) gegeben, indem er die Nadel mit einem Rotationsellipsoid umgibt und dieses mit Draht bewickelt.

Man sieht, daß der Tangentenbussole sowohl von seiten der Konstrukteure als von den Theoretikern erhebliche Aufmerksamkeit gewidmet worden ist. Dies bewirkten zwei verschiedene

[1]) Wied. Ann. 15, 552 (1882).
[2]) Ebend. 3, 36 (1878).

Gründe: einmal bot die Tangentenbussole die Möglichkeit, die Abhängigkeit der Ablenkung von der Stromstärke in irgend einem Maß, also die Kalibrierung dieses Galvanometers mit direkter Ablesung, durch theoretische Rechnung festzustellen; andererseits ließ sich der Wert des dem Instrumente eigentümlichen Konstanten in absolutem elektromagnetischem Maß berechnen, wenn die horizontale Intensität des Erdmagnetismus für den Ort der Aufstellung bekannt war. Und zwar war dieser doppelte Vorteil nur bei der Tangentenbussole, nicht auch bei der Sinusbussole vorhanden.

Absolutes Maßsystem. Einen mächtigen Stoß erhielt nun das ganze Strommessungswesen durch den Aufschwung der Elektrotechnik in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts.

Der Elektrotechniker, dessen Geist von dem Fortschritt der maschinellen Konstruktionen und den zugehörigen Arbeiten ganz in Anspruch genommen war, verlangte nach einem Strommesser mit direkter Ablesung und einfacher Handhabung, dessen Empfindlichkeit sich nicht änderte und dessen Angaben ohne oder mit wenig Rechnung auf irgend ein zuverlässiges Maß der Stromstärke bezogen werden konnten.

Diesen Ansprüchen konnte die Tangentenbussole nicht genügen, weil sie in den Hauptstromkreis der Dynamomaschine eingeschaltet werden mußte und ihre Angaben daher leicht durch benachbarte Ströme usw. beeinflußt wurden, weil ferner ihr Messungsbereich nicht ausreichte, und aus anderen Gründen.

In der ersten Zeit der Entwickelung der Elektrotechnik wurde mit genügendem Erfolg das später zu beschreibende Torsionselektrodynamometer von W. Siemens benutzt, wenigstens bei der Firma Siemens u. Halske, Berlin, in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts; wie bei Gramme, Paris, wo gleichzeitig mit der erstgenannten Firma die ersten Dynamomaschinen gebaut wurden, die Ströme gemessen wurden, ist nicht bekannt geworden. Eine absolute Maßeinheit für den Strom war allerdings vorhanden, diejenige von W. Weber; sie wurde jedoch nur von einigen Gelehrten angewendet, für die Techniker waren die zu dieser Einheit gehörigen Messungen zu umständlich und paßten nicht in die Nähe von Werkstätten. Ein praktisch brauchbares Strommaß mußten aber schon damals die Techniker haben; man half

sich daher, so gut man konnte; so wandte der Verfasser[1]) damals in seinen Arbeiten über Dynamomaschinen das Verhältnis der elektromotorischen Kraft eines Daniellschen Elements zu der Siemensschen Widerstandseinheit als Strommaß an.

Als nun aber Ende der siebziger Jahre des vorigen Jahrhunderts alle Nationen anfingen, sich an dem Wettkampf um die Dynamomaschine zu beteiligen und immer mehr Strommesser entstanden, wurde auch die Frage nach Einführung des absoluten elektrischen Maßsystems akut.

In den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts hatte aus wissenschaftlichen Gründen die British Association for the Advancement of Science eine Kommission zur Fortführung der Arbeiten über jenes Maßsystem eingesetzt; dieselbe hatte die beiden von W. Weber vorgeschlagenen Maßsysteme, das elektromagnetische und das elektrostatische, diskutiert, sich für das erstere und für die Grundmaße: Centimeter, Gramm, Sekunde, entschieden und eine Reihe dahin gehöriger experimenteller Arbeiten ausgeführt. Als nun 1881 die Franzosen den „psychologischen Moment“ erkannten und die erste internationale elektrische Ausstellung in Paris abhielten, wurde mit derselben der erste elektrische Kongreß verbunden, welcher das Webersche elektromagnetische Maßsystem zur wissenschaftlichen und gesetzlichen Grundlage erhob und als praktische Grundmaße das Ampere für den Strom, das Volt für die Spannung, das Ohm für den Widerstand einführten. Ein schönerer Erfolg hätte der großen Gedankenreihe von Gauss und W. Weber, welche etwa ein halbes Jahrhundert vorher im Anfangsstadium der Kenntnisse vom elektrischen Strome mit durchdringender Voraussicht die magnetischen und elektrischen Maße mit den mechanischen Grundmaßen verknüpft hatten, nicht beschieden sein können.

Die Diskussion über die elektrischen Maßeinheiten war nun beendet; die Techniker beeilten sich, ihren Arbeiten immer mehr Messungen einzufügen, was vorher vielfach nicht geschehen war, und Meßinstrumente zu konstruieren, welche die Ströme in Ampere, die Spannungen in Volt angaben, und deren Meßbereich sich, den praktischen Forderungen folgend, beliebig erweitern ließ.

---

[1]) Elektrotechn. Zeitschr. 1881, S. 134.

Torsionsgalvanometer von Siemens u. Halske. Eins der ersten Instrumente dieser Art, welches die Forderungen der Technik recht vollständig erfüllte, war das vom Verfasser konstruierte und durchgebildete Torsionsgalvanometer von Siemens u. Halske [1]).

Zu diesem Zwecke ließ sich ein Galvanometer mit dem Erdmagnetismus als Richtkraft nicht benutzen, weil die Angaben an beliebigen Orten gleich sein sollten. Es wurde, ähnlich wie in der Coulombschen Drehwage, die Torsion als Richtkraft benutzt, und zwar diejenige einer Spiralfeder. Der Vorteil, den z. B. die Tangentenbussole besitzt, daß die Angaben des Instrumentes unabhängig sind von dem magnetischen Moment der Nadel, ging hierdurch verloren; aber da als Magnet ein Glockenmagnet (s. S. 20, Fig. 7) verwendet wurde, bei welchem die beiden Hälften des Magnets gegenseitig ihren Magnetismus binden, und durch sorgfältige Anfertigung und Behandlung wurden recht konstante Magnete erhalten.

Die Messung erfolgt, wie bei der Coulombschen Drehwage, in der Weise, daß der Magnet nach der Stromgabe durch Torsion der Feder in die Lage, die er ohne Strom einnahm, zurückgebracht und der Torsionswinkel abgelesen wird; der Torsionswinkel ist alsdann das Maß des Stromes. Das Instrument ist also ein solches mit konstanter Lage der wirkenden Teile. Der Erdmagnetismus kommt beinahe nicht in Betracht.

Um aus der Zahl des Torsionswinkels unmittelbar, nur durch Einsetzen eines Kommas, die Ampere bzw. Volt zu erhalten, wurde der Widerstand der Galvanometerwickelung in Ohm justiert und die Torsionsfeder in Länge, Querschnitt usw. so abgeglichen, daß diese Übereinstimmung zutraf. Um ferner die zum Apparate gehörigen Widerstände bei allen Exemplaren auf gleiche Werte zu bringen, wurde der Widerstand der Windungen stets auf dieselbe dekadische Größe gebracht, z. B. 1 Ohm, 100 Ohm.

Die Ausdehnung des Meßbereiches auf die namentlich von der Technik verlangten Grenzen erfolgte dadurch, daß für Strommessungen eine Skala von Nebenschlußwiderständen, für Spannungsmessungen eine Skala von Vorschaltwiderständen beigegeben wurde.

---

[1]) Elektrotechn. Zeitschr. 1880, S. 200.

Auf diese Weise ließen sich sämtliche Messungen betreffs Strom und Spannung an Gleichstrommaschinen mit einem einzigen Instrument ausführen, während vorher nur Instrumente für Strom oder Spannung und für einzelne kleinere Meßbereiche existierten.

Die Anordnung der Messungen an Gleichstrommaschinen war bereits vom Verfasser[1]) angegeben worden, namentlich die Art, wie man, außer den bereits damals üblichen Strommessungen, auch die Spannungen, an den Klemmen der stromgebenden Maschine und im äußeren Stromkreise, messen und wie man aus Spannungs- und Strommessungen die elektromotorische Kraft und die elektrische Energie, sowohl von stromgebenden Maschinen (Generatoren) als auch von stromempfangenden (Motoren), berechnen kann. Zu jenen Messungen diente bereits ein Torsionsgalvanometer. Fig. 29 zeigt dieses Instrument.

m ist der Glockenmagnet, dessen Fortsetzung nach oben, ein Messingstäbchen *a*, an einem Kokonfaden aufgehängt und an der vertikalen Torsionsfeder *f* befestigt ist; das obere Ende dieser Feder ist an dem randrierten Torsionskopf *k* befestigt, der bei der Messung mit der Hand gedreht wird. An dem Torsionskopf sitzt ferner ein horizontaler, unter der Glasplatte *p* spielender Zeiger; auf der Unterseite der Glasplatte ist eine Kreisteilung, in 180 Striche, angebracht, auf welcher die Stellung des Zeigers, auf etwa $^1/_{10}$ Strich genau, abgelesen werden kann.

An dem Messingstäbchen *a* sitzen ferner zwei Flügel *f* aus Glimmer, welche sich zwischen den nach Art einer Schere gestellten Messingplättchen *gg* bewegen können und die Schwingungen des Magnetes dämpfen. *z* ist ein am Magnet angebrachter und neben dem Torsionszeiger auf derselben Kreisteilung spielender Zeiger, welcher die Lage des Magnets anzeigt.

dd sind die vertikal gestellten Windungskästchen, *ee* die Endklemmen der Wickelung, *b* das um die vertikale Achse drehbare Grundbrett, *a* die zur Lösung und Arretierung des Grundbrettes dienende Schraube. Zur Arretierung des Magnets dient eine in der Figur nicht sichtbare, am Grundbrett sitzende Schraube; ist dieselbe angezogen, so ist der Magnet festgeklemmt und das Instrument beliebig transportabel.

---

[1]) Elektrotechn. Zeitschr. 1881, S. 134.

Bei der Messung wird zunächst die Arretierungsschraube gelöst und das Grundbrett mittels der Stellschrauben so eingestellt, daß eine die untere Fortsetzung des Magnetes bildende Messingspitze über dem Mittelpunkt eines darunter angebrachten Kreuzes steht, dann Schraube *a* gelöst und das Grundbrett so



Fig. 29.



gedreht, daß der Magnetzeiger auf Null zeigt, wenn der Torsionszeiger ebenfalls auf Null steht. Dann wird Strom in bestimmter Richtung gegeben, wodurch der Magnetzeiger nach rechts geht, und am Torsionskopf *k* so lange gedreht, bis der Magnetzeiger wieder auf Null zeigt; dann wird die Lage des Torsionszeigers abgelesen.

Das Torsionsgalvanometer wurde in zwei Formen ausgeführt, von 1 Ohm und von 100 Ohm Widerstand. Dem ersteren wurden Nebenschlüsse von $^1/_9$, $^1/_{99}$, $^1/_{999}$ Ohm zur Strommessung von 0,001 bis 180 Ampere, und Vorschaltwiderstände von 9, 99, 999 Ohm zur Spannungsmessung von 0,001 bis 180 Volt beigegeben; die andere Form erhielt Nebenschlüsse von $^{100}/_9$, $^{100}/_{99}$ Ohm zur Strommessung von 0,01 bis 180 Ampere und Vorschaltwiderstände von 900, 9900 Ohm zur Spannungsmessung von 0,01 bis 180 Volt.

Eine Voraussetzung der ganzen Art der Messung, daß nämlich die durch das Instrument gehenden Ströme den im Kreise der Maschine fließenden Strom nur wenig verringern, war reichlich erfüllt.

Eine andere Voraussetzung dieser Messungen, daß in der Nähe des Instrumentes keine stärkeren Ströme oder Magnete sich befinden, konnte auch in Maschinenlaboratorien meist erfüllt werden, da Zuleitungen von erheblicher Länge benutzt werden durften.

Mit diesem Instrument wurde z. B. bereits 1879 in der ersten elektrolytischen Kupferraffinieranlage zu Oker ein Strom von etwa 1000 Ampere gemessen, indem man die Zuleitungen des Instrumentes an zwei Stellen der Hauptleitung anlegte, wobei der Widerstand der letzteren zwischen jenen Stellen aus den Dimensionen und der Leitfähigkeit berechnet wurde.

Instrumente von Weston. Wenn auch durch das Torsionselektrodynamometer und das Torsionsgalvanometer von Siemens u. Halske das Bedürfnis der Technik da, wo diese Instrumente gebraucht wurden, befriedigt war, so war diese Befriedigung doch nur eine provisorische. Das Bedürfnis nach einem Präzisionsstrommesser mit direkter Ablesung, ohne Einstellung, blieb, die Anstrengungen, einen solchen zu konstruieren, wurden fortgesetzt und in den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts auch von Erfolg gekrönt.

Das Haupthindernis, welches sich dieser Konstruktion entgegenstellte, war die Schwierigkeit, die Spitzenlagerung, welche bei solchen Instrumenten angewendet werden muß, so zu verbessern, daß die Messungen den genügenden Grad von Sicherheit und Genauigkeit erhielten.

Bei der bisher benutzten Tangentenbussole mit Nadel auf Spitze war dies nicht der Fall, obschon dieselbe meist eine fein

geschliffene Stahlspitze und Achathütchen erhielt; wenn dieselbe viel gebraucht wurde, und namentlich, wenn dieselbe längere Zeit aus Unachtsamkeit nicht arretiert, d. h. die Nadel nicht festgeklemmt wurde, so wurde schließlich die Einstellung der Ruhelage und der Ablenkungen, namentlich die größeren, so unsicher, daß das Instrument auch für grobe Messungen kaum tauglich war. Wendete man statt der Spitzenlagerung Aufhängung an Kokonfaden an, so fiel allerdings dieser Fehler weg, aber die Notwendigkeit einer sorgfältigeren Aufstellung und Handhabung trat hinzu, und damit konnte sich namentlich der rasch arbeitende Elektrotechniker nicht befassen.

Im Jahre 1891, auf der elektrotechnischen Ausstellung zu Frankfurt a. M., wurden nun zum erstenmal, in Deutschland wenigstens, Instrumente gezeigt, bei welchen die Spitzenaufhängung mit einer alle Ansprüche befriedigenden Genauigkeit und Sicherheit ausgeführt war; es waren dies die Westonschen Präzisions-Ampere- und Voltmeter. Dieselben ließen in der Ruhelage und der Ablenkung, bei oft wiederholter Einstellung, keine Unterschiede mehr erkennen und ertrugen in unarretiertem Zustande die stärksten Schläge und Erschütterungen ohne Schaden.

Dieser Erfolg war zum Teil dadurch erzielt, daß der bewegliche Teil bei starker Erschütterung nur ganz geringe Bewegungen ausführen und daher beim Niederfall die Spitze sich nur möglichst wenig beschädigen konnte; auch war die Achse, an welcher die Spitzen saßen, nicht starr, sondern federnd nachgiebig konstruiert. Infolgedessen bedurften diese Instrumente kaum einer Arretierung, konnten also durch Unterlassen der Arretierung auch nicht leiden und waren bequem tragbar.

Der wesentlichste Teil dieses Fortschrittes rührte wohl davon her, daß die Anfertigung der Spitzen und Lager mit derselben Sorgfalt gehandhabt wurde, welche der Uhrmacher bei Taschenuhren anwendet, daß als Material die härtesten und der feinsten Politur fähigen Metalle und Edelsteine gewählt und für das Schleifen das Mikroskop zu Hilfe genommen wurde.

Nachdem dieser Erfolg einmal dargetan war, wurde diese Lagerungstechnik allmählich von allen Fabrikanten adoptiert, und es dürften heutzutage kaum feinere Instrumente mit direkter Ablesung auf den Markt kommen, welche diese Verbesserung nicht besitzen.

Weitere Vorzüge der Westonschen Präzisionsstrommesser mit direkter Ablesung bestanden darin, daß die Skala eine beinahe genau proportionale war, daß die Nähe von starken Strömen oder Magneten die Messung nicht beeinflußte, und daß die Schwingungen beinahe oder ganz aperiodisch waren. Diese Vorzüge wurden erreicht durch Adoptierung des Thomsonschen Prinzips der in magnetischen Feldern beweglichen Drehspule, welches zwar damals bereits in den gröberen Strommessern von Deprez-d'Arsonval und den Spiegelgalvanometern von d'Arsonval in die Meßtechnik eingeführt, aber noch nicht zur Konstruktion von Präzisionsstrommessern mit direkter Ablesung benutzt und durchgeführt war. Für die Beschreibung dieses Prinzips verweisen wir auf S. 27 ff.

Eine proportionale Stromskala für solche Instrumente war damals ein wesentlicher Fortschritt; denn hätte man die Tangentenbussole oder das Torsionselektrodynamometer mit Stromskalen versehen, so wäre die erstere Skala, bei wachsendem Strom, sich stark verengend, die letztere sich stark erweiternd, ausgefallen; nur das Torsionsgalvanometer gab auch eine proportionale Stromskala, verlangte aber eine Einstellung, nicht bloß eine Ablesung. Vor rein empirischen Skalen anderer Strommesser hatten die Skalen dieser vier Instrumente den Vorzug, daß sie größere Sicherheit gewährten, da die Skala im wesentlichen gegeben war und nur kleine Abweichungen zu berücksichtigen waren, während rein empirische Skalen ganz von der Genauigkeit der Justierungsmessungen, der Interpolation und der Aufzeichnung abhängen.

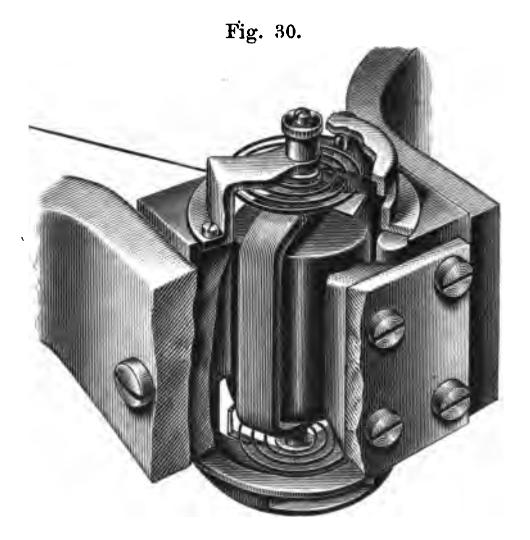
Daß die Angaben dieser Instrumente direkt in absolutem Maße, Ampere oder Volt, erfolgten, war schon damals Gemeingut aller Strommesser, da solche Eichungen sich mit Hilfe staatlicher Institute oder durch besondere Einrichtungen leicht und sicher ausführen ließen.

Die starke elektrische Dämpfung, welche dem Thomsonschen Prinzip innewohnt, haben wir bereits S. 33 besprochen; die Schwierigkeiten, welche für ballistische Spiegelgalvanometer aus dieser Eigenschaft entstehen, fallen hier zum großen Teil weg, da es sich hier nur um dauernde Ablenkungen handelt. Alle diese Instrumente sind ganz oder beinahe ganz aperiodisch.

Fig. 30 stellt das Innere eines Westoninstrumentes dar

An die Pole eines kräftigen Hufeisenmagnets sind halbrunde ausgedrehte Eisenstücke angeschraubt, welche mit dem zylinderförmigen Eisenkern zwei ringförmige Hohlräume, die magnetischen Felder, bilden, in welchen die vertikalen Schenkel der beweglichen rechteckigen Stromspule sich bewegen. Die in Spitzen endigende Achse der letzteren trägt oben und unten je eine metallene, flache Spiralfeder, deren andere Enden an den darüber bzw. darunter angebrachten, mit konischen, die Spitzen aufnehmenden Lagern versehenen Tragarmen befestigt sind und die

Fig. 30.



Stromzuleitung zu der Spule bewirken. An der Spule sitzt ferner ein Zeiger, der über der Skala spielt.

Fig. 31 zeigt ferner ein W e s t o n - N o r m a l a m p e r e m e t e r.

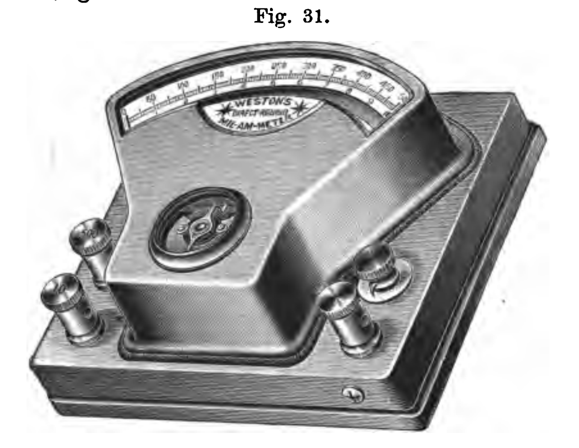
Der Deckel des Instrumentes hat eine trapezartige Gestalt. In dem längeren Schenkel sieht man die Skala, neben derselben einen Streifen Spiegelglas; der Zeiger läuft in ein dünnes, vertikal liegendes Blechstreifchen aus; man hält das Auge so, daß das Spiegelbild des Blechstreifchens sich mit demselben deckt, und liest in dieser Stellung ab; dann entsteht kein Fehler durch schiefe Betrachtung des Zeigers.

Der Bogen des Hufeisenmagnets liegt unter der Skala, die Pole unter der kürzeren Seite des Deckels; durch ein Schauglas

kann man die Spiralfedern und die Stromspule sehen; zwei Klemmen dienen zur Einführung des Stromes. Das Instrument ist auf einem Brett ohne Stellschrauben montiert, da es auf geringere Abweichungen aus der horizontalen Lage nicht ankommt; sogar wenn das Instrument in vertikaler Lage hängt, entstehen höchstens Fehler von zwei bis drei Zehntel Skalenteilung gegenüber der Angabe in horizontaler Lage, für welche das dargestellte Instrument geeicht ist.

Die magnetischen Felder sind bloß 1 mm breit, das ganze bewegliche System mit Federn, Zeiger und allem Zubehör wiegt nur etwa 1,5 g.

Fig. 31.



Der Zusammenhang der Spannungs- und der Strommessungen und die Anordnung der Meßbereiche sind dieselben, wie bei dem Torsionsgalvanometer, s. S. 40. Es werden nur wenige Typen von beweglichen Systemen hergestellt, die mit Zusatzwiderständen auf einen bestimmten Widerstand justiert sind. Direkt eignen sich diese Spulen nur für niedrige Spannungen oder kleine Ströme; durch Vorschaltwiderstände wird der Bereich der Spannungsmessung, durch Nebenschlußwiderstände derjenige der Strommessung erhöht. Die zugehörigen Widerstände werden, soweit es möglich, im Kasten des Instrumentes untergebracht, im anderen Falle als besondere Apparate beigegeben.

Die wichtigsten Firmen aller Länder, welche elektrische Meßinstrumente fabrizieren, haben die Herstellung von ähnlichen In-

strumenten aufgenommen und ihrerseits unter Anbringung von Modifikationen ausgebildet. Es hat nicht den Anschein, daß diese Modifikationen wesentlicher Natur sind. Jedenfalls sind aber durch dieses allgemeine Zusammenarbeiten die Elektrotechnik und die wissenschaftlichen Laboratorien mit einer Fülle ausgezeichneter Gleichstrominstrumente versehen worden, welche oft die Anwendung von Spiegelgalvanometern erübrigt haben und die Ausarbeitung anderer Präzisionsapparate auf lange Zeit als unnötig erscheinen lassen.

Elektrolytische Strommesser. Eine wichtige Klasse von Apparaten für Strommessung ist diejenige, in welcher die Stromstärke durch Elektrolyse von passenden chemischen Verbindungen bestimmt wird; diese Apparate beruhen auf dem Faradayschen Gesetz, nach welchem die elektrolytische Trennung oder die Menge der abgeschiedenen Körper stets proportional der Stromstärke ist und in bestimmter Beziehung zu dem Atomgewichte und der chemischen Valenz der betreffenden Körper steht.

Diese Strommessungen haben zunächst großen Wert für die absolute Bestimmung der Stromeinheit des Ampere. Denn, während die anderen Bestimmungsmethoden auf einem Komplex von elektrischen und magnetischen Messungen beruhen, bezieht sich die elektrolytische Bestimmung auf eine ganz andere Klasse von Bestimmungen, diejenigen der Atomgewichte, welche von den Chemikern zum Teil mit großer Genauigkeit ausgearbeitet sind; diese Bestimmung bietet daher zum mindesten eine sehr wertvolle Kontrolle der magnetelektrischen Bestimmungen.

Allein als ein gut brauchbarer Strommesser kann ein zur Strombestimmung eingerichteter elektrolytischer Apparat kaum betrachtet werden, schon wegen der Länge der Zeit, welche eine Messung beansprucht; auch sind die bei der elektrolytischen Bestimmung zu beobachtenden Vorsichtsmaßregeln meist chemischer Natur und fallen daher ganz aus dem Rahmen der Erscheinungen, mit welchen namentlich der Elektrotechniker sich zu beschäftigen gewohnt ist, finden daher in neuerer Zeit kaum mehr Anwendung.

In früheren Zeiten, namentlich bevor man brauchbare, in absolutem Maß geeichte Strommessungen besaß, bediente man sich gern des Silbervoltameters, d. h. einer elektrolytischen Zelle zur Zersetzung von Silbernitrat, zur Eichung von magnetelektrischen Strommessern, weil bei dieser Zersetzung die so-

genannten „sekundären" chemischen Vorgänge, welche die Genauigkeit der Bestimmung beeinträchtigen, leicht vermieden werden können. Seitdem aber durch den Staat die Genauigkeit der Stromeinheit ebenso überwacht wird, wie diejenige des Gewichtes und der Länge, hat auch die Anwendung des Silbervoltameters aufgehört.

Das Wasservoltameter, bei welchem die Stromstärke durch Beobachtung des in gemessener Zeit gebildeten Wasserstoffgases bestimmt wird, hat in früheren Zeiten noch mehr Anwendung gefunden, als das Silbervoltameter, weniger zu absoluten Bestimmungen, als zu praktischen Strommessungen für theoretische und technische Zwecke, namentlich von Faraday; dasselbe eignete sich hierfür auch besser, da der Stromdurchgang meist nur kurze Zeit in Anspruch nimmt, die Wägung eines Niederschlages fortfällt und durch die Beobachtung eines Gasvolumens an einem Gasometer ersetzt wird. Allein die Notwendigkeit, bei dieser Messung Druck und Temperatur des Gases zu beobachten, und die kleine, damit zusammenhängende Korrektionsrechnung haben diese Methode bei dem modernen Elektriker, der durch die Schnelligkeit und Einfachheit der magnetelektrischen Strommessungen immer mehr verwöhnt wurde, außer Gebrauch gebracht.

Auch die Chemiker, welche durch die Entwickelung der Elektrochemie ebenfalls auf elektrische Messungen vielfach angewiesen wurden und sich früher des Wasservoltameters bedienten, weil es in den Kreis chemischer Bestimmungen paßte, haben dasselbe in neuerer Zeit fallen lassen, weil die modernen, magnetelektrischen Strommesser bedeutend schneller und genauer arbeiteten.

Wir glauben daher für unseren vorliegenden Zweck von einer eingehenderen Betrachtung dieser Apparate absehen zu können.

d) Schalttafelinstrumente.

Der tägliche Gebrauch in modernen Maschinenhäusern und an Schalttafeln verlangte, bald nachdem die Anwendung von Gleichstrommaschinen allgemeiner wurde, möglichst einfache und billige Instrumente mit direkter Ablesung, deren Genauigkeit keine hohe zu sein brauchte.

Es haben sich für diesen Zweck eine Reihe von Typen entwickelt, welche zwar massenhaft angewendet, aber für den Fortschritt der elektrischen Messungen nicht von Einfluß waren, ausgenommen dadurch, daß sie auch in kompliziertesten elektrischen Anlagen stetige direkte Anzeigen von Strömen und Spannungen ermöglichten. Aber gerade, weil diese Aufgabe sich von derjenigen der Konstruktion feinerer Meßinstrumente unterschied, und andere Prinzipien zugrunde gelegt werden mußten, und weil den Konstrukteuren durch die geforderten billigen Preise enge Grenzen gesteckt waren, hat es auch für unsere historische Skizze Interesse, dieselben zu überblicken.

Die Schalttafel einer elektrischen Anlage dient zur Übersicht aller Vorgänge in der Anlage, sowohl in den den Strom erzeugenden Maschinen, als in den nach den Verbrauchsstellen führenden Leitungen; sämtliche Leitungen, sowohl die vom Maschinenhause kommenden als die nach dem Verbrauchsnetz gehenden, sind in der Schalttafel zusammengeführt; dieselbe enthält namentlich alle zur Ein- und Ausschaltung der Leitungen dienenden Vorrichtungen und die zur Beobachtung der Spannungen und Stromstärken dienenden Instrumente. Bei großen Anlagen ist die Schalttafel kompliziert und erreicht die Ausdehnung der Wand eines großen Zimmers.

Erfordernisse von Schalttafelinstrumenten. Die Hauptbedingung, welche die Schalttafelinstrumente erfüllen müssen, ist naturgemäß möglichst völlige Unabhängigkeit ihrer Angaben von den Einflüssen der benachbarten Instrumente und vom Strome durchflossenen Leitungen.

Diese Unabhängigkeit gewähren gewöhnliche Galvanometer mit beweglicher Magnetnadel nicht; dieselben wurden deshalb vom Anfang der Erbauung elektrischer Anlagen an für diesen Zweck außer Betracht gelassen.

Die bewegliche Magnetnadel eines Strommessers kann, aus Rücksicht auf die Empfindlichkeit des Instrumentes, nicht in Verbindung mit festen Eisenteilen gebracht werden; wenn aber nicht, mehr oder weniger, ein magnetischer Schluß der Magnetpole durch einen „Eisenanker“ vorhanden ist, so ist der Magnetismus fortwährend den schwächenden Einflüssen der magnetelektrischen Nachbarschaft ausgesetzt und kann sich daher auf die Dauer nicht halten.

Anders ist es, wenn, wie bei den Drehspulinstrumenten (Deprez-d'Arsonval), ein feststehender, starker Magnet verwendet ist, dessen Pole durch einen beinahe anliegenden, ebenfalls feststehenden Eisenkern geschlossen sind; auf einen solchen beinahe gesättigten magnetischen Kreis haben äußere magnetelektrische Wirkungen beinahe keinen Einfluß, wenn die Härtung und Magnetisierung des Magnets nach den zur Erzielung guter Haltbarkeit des Magnetismus geltenden Vorschriften erfolgt ist. Diese Instrumente haben sich daher auch zur Verwendung bei Schalttafeln gehalten, sind aber nicht sehr billig.

Wenn man endlich die Verwendung sowohl beweglicher als fester Magnete ganz vermeidet und statt derselben Eisenteile benutzt, feste oder bewegliche, so ist der Stromverbrauch im Instrumente zwar erheblich größer als bei solchen mit Magneten, aber auch die Störungen durch benachbarte Magnete oder Ströme sind geringer. Deshalb ist die Verwendung von Eisenstücken in Schalttafelinstrumenten sehr häufig, auch des billigen Preises wegen.

Volle Unabhängigkeit von äußeren Störungen besitzen die sogenannten Hitzdrahtinstrumente, d. h. solche, die auf der Ausdehnung eines vom Strome erhitzten Drahtes beruhen.

Ein weiteres Erfordernis für Schalttafelinstrumente ist rasche Beruhigungszeit oder starke Dämpfung; dieselbe wird jedoch für alle modernen Instrumente verlangt, ist daher für diese Instrumente nicht charakteristisch.

Eigentümlich für Schalttafelinstrumente indessen ist die Art der Skala. Während bei Präzisionsstrommessern eine proportionale Skala stets erstrebt wird, weil dieselbe die sicherste ist, und weil die Messungen in allen Teilen der Skala erfolgen, ist dies bei Schalttafelinstrumenten nur teilweise der Fall.

Bei elektrischen Anlagen, sowohl bei Gleich- als bei Wechselstrom, wird stets die Spannung an den Maschinen zwischen den Hauptleitern des Netzes konstant gehalten, damit die Verbrauchsapparate auch auf konstante Spannung eingerichtet und in beliebiger Anzahl zwischen zwei Hauptleitern eingeschaltet werden können. Infolgedessen zeigen die Betriebsspannungen nur geringe Variation, während die Stromstärken, der Anzahl der eingeschalteten Verbrauchsapparate entsprechend, stark variieren.

Es hat deshalb für die Spannungsmesser nur Interesse, daß die Spannungen ober- und unterhalb der Normalspannung ge-

nügend genau angegeben werden; für die Normalspannung von 110 Volt z. B. genügt es, eine Skala von 95 bis 125 Volt zu besitzen, diese aber mit so weiten Teilstrichzwischenräumen, daß noch z. B. $^{2}/_{10}$ Volt ablesbar sind; das Gebiet von 0 bis 95 Volt dagegen wird kaum gebraucht.

Bei den Strommessern dagegen kann der Strom von den kleinsten Werten bis zum Maximum variieren; es wäre also im allgemeinen eine proportionale Skala am Platze. Indessen ist es auch hier meist von geringem Wert, die geringen Stromstärken, z. B. bei einer Beleuchtungsanlage am Tage, zu kennen, und man zieht vielfach eine Skala vor, bei der die geringen Werte nur ungenau, diejenigen dagegen z. B. von der Hälfte des Maximums an bis zu demselben ziemlich genau gemessen werden können.

Für Schalttafelinstrumente sucht man daher Skalen herzustellen, bei denen die Zwischenräume der Teilstriche anfangs ganz klein sind, dann wachsen und im Hauptmeßbereich groß und einigermaßen gleich sind. Hierfür eignen sich nicht alle elektromagnetischen Anordnungen in gleicher Weise, und es ist daher diese Rücksicht oft bestimmend für die Wahl der Anordnung.

Bei Schalttafelinstrumenten kommt es endlich oft vor, daß sie sich sowohl für Gleich- als für Wechselstrom eignen und daß dieselbe Skala, eventuell mit geringen Abänderungen, für beide Fälle gilt. Diese Ausdehnung des Meßbereichs wird seltener durch die Art des Gebrauchs verlangt, liegt aber im Interesse des Fabrikanten, der auf diese Weise die Anzahl seiner Apparattypen wesentlich verringern kann.

Die wichtigsten Kategorien dieser Instrumente sind die folgenden:

- Instrumente mit permanenten Magneten und beweglicher Spule;
- Instrumente mit Eisenkernen;
- Hitzdrahtinstrumente.

Um wenigstens eine Übersicht über diese Instrumente, von denen wohl keines eine durchgreifende Bedeutung besitzt, zu haben, geben wir nur kurze Beschreibungen mit Abbildungen, ohne Erläuterung der mechanischen Einzelheiten.

Schalttafelinstrumente mit permanenten Magneten und beweglicher Stromspule. Unter diese Kategorie fallen nur die Deprez-d'Arsonval- oder Drehspulgalvanometer.

S. 27 ff. haben wir gesehen, wie bei der Entwickelung dieser Instrumente zunächst die Konstruktion von einfachen, d. h. Schalttafelinstrumenten, vorwaltete und später erst die Spiegelgalvanometer und Präzisionsinstrumente dieses Systems ausgebildet

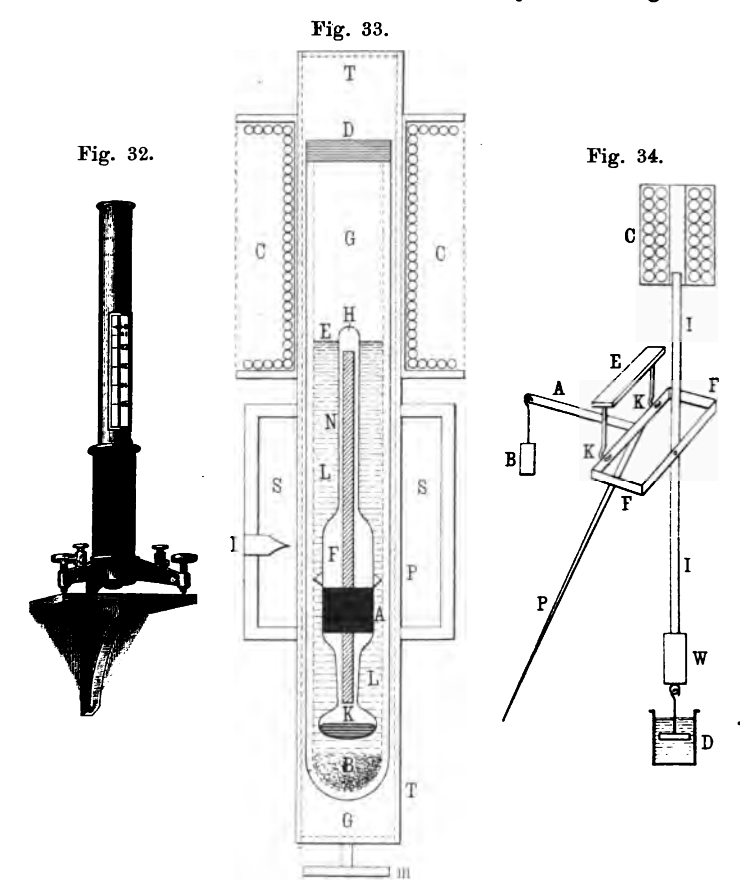


Fig. 32. Fig. 33. Fig. 34.

wurden; wir können daher für die Beschreibung der betreffenden Schalttafelinstrumente auf jene Ausführungen uns berufen.

Es ist nur hinzuzufügen, daß die Skalen dieser Drehspulgalvanometer entweder anfangs weite, später enge Strichzwischenräume zeigen — wenn die Polschuhe des Magnets nur

einen Teil des Eisenkerns umfassen — oder aber proportional sind, wenn der größte Teil des Eisenkerns umfaßt wird.

Eine anfangs enge, später weite Skala läßt sich bei diesen Instrumenten nicht unmittelbar erlangen.

Dieselben werden namentlich von Carpentier in Paris fabriziert.

Schalttafelinstrumente mit Eisenkernen. Die einfachste Form der elektromagnetischen Anordnung — Spule, Eisenstück — ist diejenige, bei welcher ein beweglicher Eisenstab in die Stromspule hineingezogen wird.

Diese Anordnung liegt folgenden Instrumenten zugrunde.

Bei dem Instrumente von Kohlrausch (s. Fig. 32) wird ein an einer Spiralfeder aufgehängter, vertikaler Eisenstab in eine Stromspule hineingezogen und trägt eine Marke, welche sich über einer vertikalen Skala bewegt. Die Skala ist eine sich verengende; eine Dämpfung fehlt meist.

Bei dem elektromagnetischen Aräometer von Atkinson (s. Fig. 33) ist ein leichter Eisenkern K in den Glaskörper F eines Aräometers gesteckt, welcher sich in der Flüssigkeit L bewegt, durch den Strom der Spule C aufwärts gezogen und durch die Glasspitzen P von der Wand des Glasgefäßes abgehalten wird. A ist ein zum Ablesen dienendes weißes Band; von außen erscheint der bewegliche Körper mit Ausnahme des Bandes schwarz; die Lage des oberen Randes des Bandes auf der Skala wird beobachtet; J ist eine bewegliche Spitze, welche auf den Normalwert der Spannung oder des Stromes eingestellt wird.

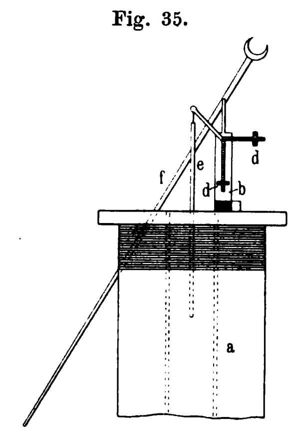
Das Instrument besitzt gute Dämpfung und zeichnet sich durch Abwesenheit von Achsen und Lagern aus; die Skala ist ziemlich gleichmäßig.

Bei den Instrumenten von Lord Kelvin (s. Fig. 34) wird der Eisenstab I in die Spule C gezogen, und dessen Bewegung durch diejenige des Kölbchens D in Flüssigkeit gedämpft. Die Verwandlung derselben in die Drehung des Zeigers P geschieht vermittelst des Rähmchens F, welches in den Ösen KK hängt, während das am Arme A hängende Gewicht B zur Äquilibrierung dient.

Die Dämpfung ist stark, die Skala ziemlich gleichmäßig, beim Transport jedoch Vorsicht geboten.

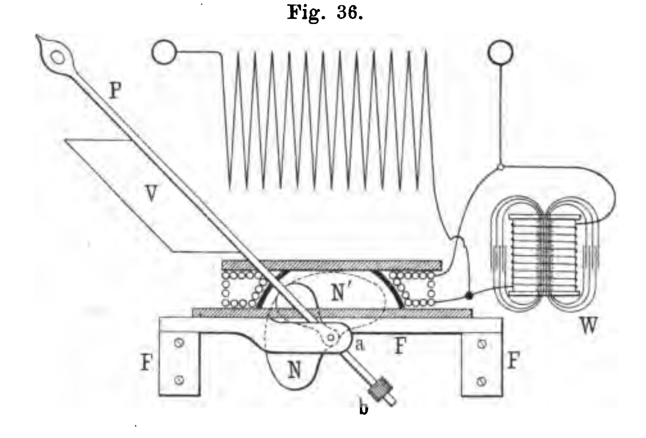
Bei den Instrumenten der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft Berlin (s. Fig. 35) wird das Eisendrahtbündel *e* in die Spule *a* gezogen; dasselbe hängt lose an einem Hebelarme, der auf derselben Achse sitzt, an welchem auch das mit dem Zeiger *f* verbundene Stäbchen befestigt ist; *b* und *d* sind Gegengewichte. Alle Teile sind sehr leicht gearbeitet; durch kleine Veränderungen kann die Skala ziemlich gleichmäßig oder sich erweiternd gestaltet werden. Die Dämpfung ist gering. Die Verwandlung der Bewegung des Eisenkörpers in die drehende des Zeigers ist dadurch erleichtert, daß die erstere bereits auf einer Drehung beruht.

Fig. 35.



Bei den Instrumenten von Everett, Edgcombe & Co. (E. E. C.), s. Fig. 36, hat der Hohlraum der Drahtspule die Form eines Halbkugelsegments, in welches das nierenförmige drehbare Eisenblech NN' hineingezogen wird; der Zeiger P mit Windflügel V sitzt auf der Achse

Fig. 36.



des Eisenbleches. Die Angaben der Instrumente sind bei Gleich- und bei Wechselstrom gleich gemacht durch Einfügung eines induktionslosen Widerstandes und eines Elektromagnets, dessen

Eisenkern die gebogenen Drähte *W* bilden, in der in der Figur angegebenen Schaltung.

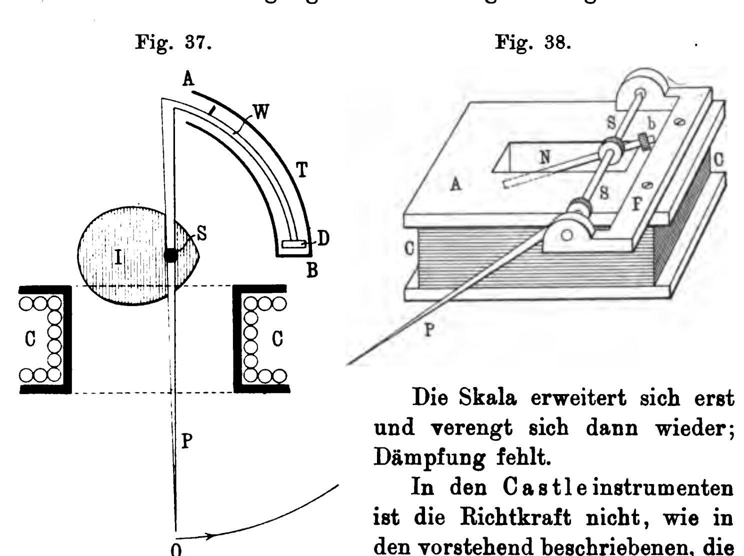
Die Skala ist ziemlich gleichmäßig; Dämpfung ist gering.

Bei den Instrumenten von Siemens u. Halske (s. Fig. 37) wird ein ovales, um eine exzentrische Achse *S* bewegliches Eisenblech *I* in den Hohlraum der Spule *C* gezogen. *P* ist der Zeiger, welcher am oberen Ende das rund gebogene Stück *W* mit dem Kölbchen *D* trägt; da das letztere sich in dem einseitig verschlossenen Röhrchen *A B* bewegt, entsteht eine Luftdämpfung, welche die Bewegungen beruhigt.

Die Skala ist eine sich erweiternde.

Miller (s. Fig. 38) läßt einen um eine seitliche Achse *S* drehbaren Eisenstab *N* in den Hohlraum der Spule *A* hineinziehen und diese Bewegung durch den Zeiger *P* angeben.

Fig. 37. Fig. 38.



Die Skala erweitert sich erst und verengt sich dann wieder; Dämpfung fehlt.

In den Castleinstrumenten ist die Richtkraft nicht, wie in den vorstehend beschriebenen, die Schwere, sondern eine magnetische, indem der um die Achse *aa* drehbare prismatische Eisenkern *N' S'* von den Polen *SN* des Magnets *M* festgehalten, aber aus dieser Lage durch die Stromrollen *C C*, welche die Pole *ns* bilden, abgelenkt wird; der Zeiger *P* gibt die Drehung an.

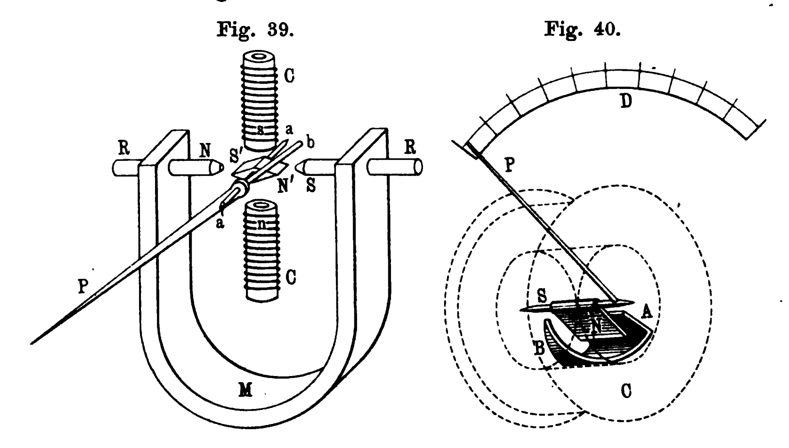
Die Skala ist recht gleichförmig; Dämpfung fehlt.

Bei den folgenden Instrumenten fällt die Achse, an welcher das Eisenstück sitzt, mit der Achse der Spule zusammen; das bewegliche Eisenstück verschiebt sich also nicht in der Längsrichtung der Spule und wird von festen, im Hohlraume der Spule angebrachten Eisenteilen angezogen.

v. Kramer & Co. (s. Fig. 40). Es wird ein bewegliches, vierkantiges Eisenblech N von einem festen Eisenblech A angezogen, wobei das mit A verbundene, zungenartige Eisenblech B die Anziehung gleichsam über einen größeren Raum ausdehnt und die Skala zu einer beinahe gleichmäßigen macht.

Bei den Evershedinstrumenten (s. Fig. 41) ist das bewegliche, vierkantige Eisenblech N und das feste Eisenblech $HMKA$

Fig. 39. Fig. 40.



an der zylindrischen Wand des Spulenhohlraumes angeordnet und entsprechend gekrümmt. Das feste Blech hat zwei einander gegenüberstehende Zungen H, A, über welche das bewegliche Blech N sich zu stellen sucht. Teilweise wird eine Luftdämpfung beigegeben; Skala ziemlich gleichmäßig.

Hartmann und Braun (s. Fig. 42) wenden ein festes W und ein bewegliches N Eisenblech, beide viereckig, an; das letztere sucht sich so zu stellen, daß die Längskanten der beiden Bleche einander gegenüberstehen.

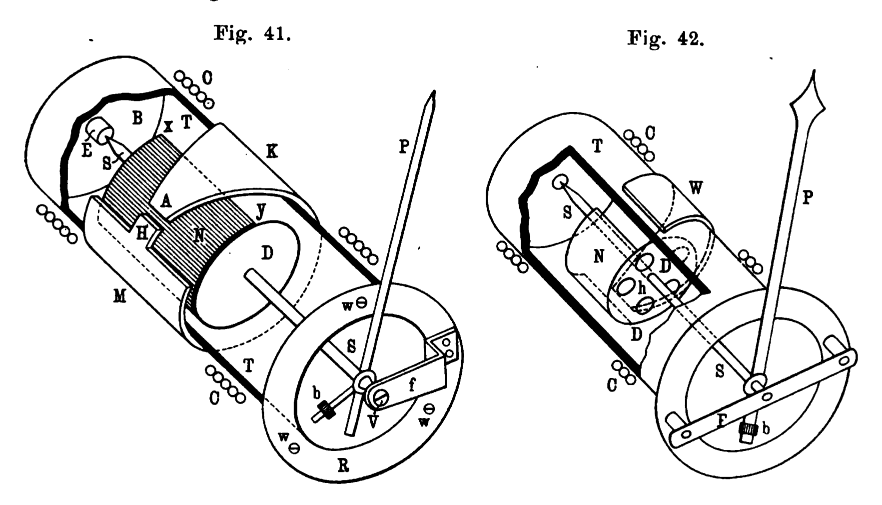
Die Skala ist anfangs sehr eng, in dem Bereich des Normalwertes (z. B. 100 Volt) gleichmäßig und weit. Eine Dämpfung ist nicht angewendet.

Bei den Instrumenten von Schuckert (s. Fig. 43) liegt die Achse s des beweglichen Systems parallel zu der Spulenachse, aber seitlich. Ein festes Eisenblech ist gar nicht vorhanden, das bewegliche Eisenblech $a\,d$ ist eben so lang wie die Spule und in der in der Figur angegebenen Weise umgekniffen; die gekrümmte Fläche desselben sucht sich den Drahtwindungen C zu nähern, wodurch Drehung entsteht.

Skala recht gleichmäßig; Dämpfung nicht angewendet.

Alle unter diese Klasse fallenden Instrumente sind für Gleich- und Wechselstrom brauchbar; Skalen, welche sich erweitern, zeigen namentlich die deutschen Instrumente.

Fig. 41. Fig. 42.



Die vorstehende unvollständige Übersicht zeigt, wie vieler und zum Teil origineller Lösungen die Konstruktion der magnetelektrischen Schalttafelinstrumente fähig ist, und wie die Konstrukteure aller Länder hier gewetteifert haben, ohne daß ein entschiedener Sieg erfochten wurde.

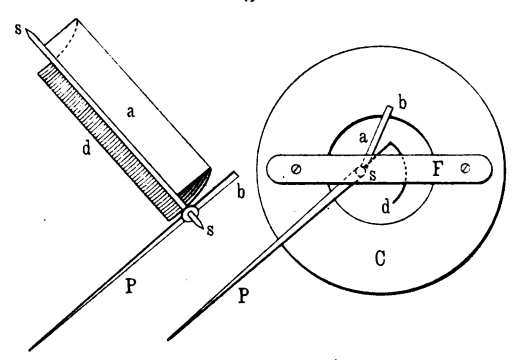
Hitzdrahtinstrumente. Diese beruhen, wie bereits oben bemerkt, auf der Erwärmung feiner Drähte durch den Strom und der Messung der durch dieselbe bedingten Ausdehnung.

Dieses Prinzip hat den Vorzug nicht nur der Einfachheit, sondern auch der völligen Unabhängigkeit von magnetelektrischen Störungen und, bei Wechselströmen, der Einflüsse der Perioden-

zahl und der Selbstinduktion und hat deshalb etwas Verführerisches. Die Ausführung des Prinzips jedoch bedarf, um dem Instrumente die nötige Empfindlichkeit zu geben, so vieler Feinheiten in Konstruktion und Herstellung, daß durch die dadurch entstehenden Nachteile die Vorteile des Prinzips ziemlich aufgehoben werden.

Die Ausdehnung durch die Wärme ist innerhalb gewisser Temperaturgrenzen proportional der Temperaturerhöhung, steht aber in keinem einfachen Verhältnis zu dem die Erwärmung bewirkenden elektrischen Strome. Denn die durchgeschickte elektrische Energie ist im wesentlichen, wenn der Widerstand des Körpers sich nicht stark mit der Temperatur ändert, proportional

Fig. 43.



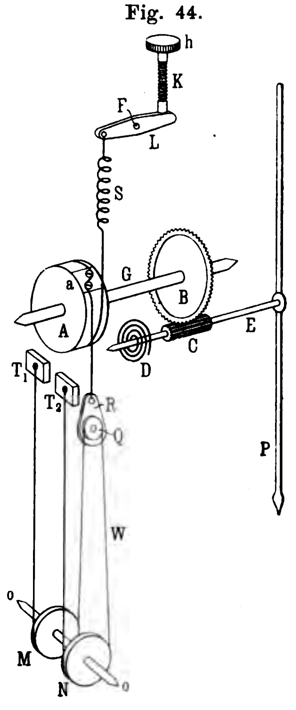
dem Quadrat des Stromes und außerdem, im Temperaturgleichgewicht, der Wärmestrahlung des Drahtes, welche nur bei geringer Temperaturerhöhung derselben proportional ist; die Ausdehnung steht daher in keiner einfachen Abhängigkeit von dem Strome und die Skala des Instrumentes kann nur eine empirische sein.

Das letztere ist indessen bei den anderen Schalttafelinstrumenten auch der Fall. Eine ernsthaftere Schwierigkeit jedoch liegt in der Frage, ob die Angaben des Instrumentes sich im Gebrauch nicht ändern, d. h. ob die Länge des Hitzdrahtes bei derselben Temperatur durch das fortwährende Erwärmen und Abkühlen nicht verändert wird, da doch, um die Ausdehnung messen zu können, der Draht stets durch eine Feder angespannt wird, und bei der Erwärmung, mit welcher auch eine Erweichung

immer verbunden ist, eine dauernde Verlängerung eintreten kann. Auch könnte die oben erwähnte, dauernd gespannte Feder allmählich nachgeben.

Ferner ist die Ausdehnung stets eine kleine, es müssen also subtile Mittel angewendet werden, um dieselbe deutlich sichtbar zu machen, und es fragt sich, ob diese Instrumente die unfeine Behandlung, welcher Schalttafelinstrumente ausgesetzt sind, ohne Schaden ertragen. Auch muß die Konstruktion darauf Bedacht nehmen, daß nicht die Schwankungen der Lufttemperatur, welche in dem Schalttafelraum einer elektrischen Anlage nicht unbedeutend sind, schon Ausschläge hervorbringen, ohne daß Strom durchgeht.

Fig. 44.



Es ist indessen anzunehmen, daß bei diesen Instrumenten, die von Major Cardew vor längerer Zeit erfunden und jetzt auch von Hartmann und Braun in kompendiöserer Form und veränderter Konstruktion fabriziert werden, die obigen und andere Schwierigkeiten so weit überwunden sind, daß die an Schalttafelinstrumente gestellten Anforderungen erfüllt sind. Wir beschreiben kurz die Wirkungsweise des von dem ersteren konstruierten Instrumentes (s. Fig. 44).

Der zu erhitzende feine Platinsilberdraht ist zwischen T_1 und T_2 über M, Q, N ausgespannt; M, N, Q sind lose Röllchen; an dem Q tragenden Stück ist in R ein Draht festgeklemmt, der über die Rolle A geschlungen ist und an die Spiralfeder S und das um F drehbare Stück L führt; durch Anziehen der Schraube h werden alle diese Drähte gespannt. Sowie der Draht $T_1 T_2$ sich durch Strom erwärmt, wird Q nach oben gezogen, die Rolle A dreht sich, und mit derselben, infolge des Getriebes $B C$, viel stärker der an der Achse E befestigte Zeiger P.

Die äußere Form der Hitzdrahtinstrumente von Hartmann und Braun ist dieselbe wie bei allen Schalttafelinstrumenten, nämlich einer runden, an die Wand zu hängenden Dose, auf welcher unter einer Glasplatte Skala und Zeiger sichtbar sind. Die Skala ist eine sich erweiternde und zeigt unter etwa $^1/_5$ des Maximalstromes überhaupt keinen Strom an.

e) Galvanoskope.

Eine der für den Techniker leichteren Aufgaben auf dem Gebiete der Gleichstrommesser ist die Konstruktion eines Galvanoskops, d. h. eines Strommessers, der nur anzeigen soll, ob Strom vorhanden ist und welche Richtung er besitzt, wobei die Empfindlichkeit, je nach dem Zweck, eine größere oder kleinere, im allgemeinen jedoch eine niedere Stufe einnimmt.

Diese Instrumente, deren Einrichtung ja bereits durch die Entdeckung Örsteds gegeben war, kamen namentlich in Aufnahme durch die elektrische Telegraphie, in deren Betrieb sich bald das Bedürfnis nach solchen einfachen Stromzeigern einstellte, um die Kontinuität der Leitung, die richtige Funktionierung der Apparatenschaltung, der einzelnen Apparate, der Batterie usw. zu prüfen. Der eigentliche Telegraphenapparat, der die Zeichen aufzuschreiben, also eine mechanische Arbeit zu verrichten hat, ist naturgemäß weniger empfindlich und von mechanischen Unregelmäßigkeiten abhängig, als ein Galvanoskop; das letztere dient daher namentlich zur Untersuchung in Fällen des Versagens der Zeichengebung.

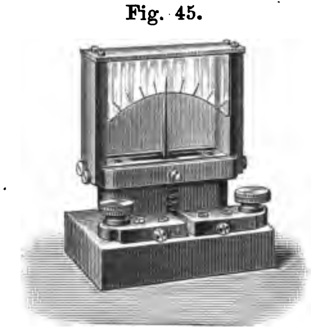
Zu telegraphischen Zwecken konstruierte man bald Galvanoskope mit horizontaler Achse, also vertikalem Skalenblatt, weil dasselbe von dem sitzenden Telegraphisten stets beobachtet werden kann; bei diesem Instrumente lagen der Magnet und die Windungsebene früher meist vertikal, in neuerer Zeit meist horizontal, wobei der Magnet auf Schneiden gelagert war. Zu Demonstrationszwecken dienen heutzutage auch vielfach größere Vertikalgalvanoskope. Fig. 45 zeigt ein Vertikalgalvanoskop, Modell der deutschen Reichspost.

Allgemeine Verwendung ferner finden heutzutage Galvanoskope bei einfachen Widerstandsmessungen und Isolationsprüfungen, welche die Monteure elektrischer Anlagen

fortwährend auszuführen haben. Hierbei wird schon größere Empfindlichkeit verlangt, als bei dem Telegraphengalvanoskop, weil der Telegraphist zu seinen Prüfungen meist die kräftige Telegraphenbatterie verwenden kann, der Monteur dagegen auf eine kleine, leicht tragbare Batterie oder kleine elektrische Maschine angewiesen ist.

Weil ferner die Widerstandsmessung mit der Wheatstoneschen Brücke in einem „Tasten“, d. h. Aufsuchen der Gleichgewichtsstellung der Brücke, besteht, so muß ein solches Galvanoskop rasch ausschlagen und namentlich auch rasch in Ruhe kommen; es hat sich daher bei deren Bau wie bei der Konstruktion der feineren Galvanometer eine stetige Verkleinerung der Magnete und auch die Anbringung von Dämpfungsvorrichtungen bemerklich gemacht.

Fig. 45.



Bei diesen letzteren Galvanoskopen zieht man gewöhnlich die horizontale Anordnung, d. h. mit horizontaler Skala, vor, weil der Messende meist steht, um die Widerstandsapparate zu übersehen, und daher das Galvanoskop von oben beobachtet. Dieselben werden, je nach dem betreffenden Zweck, teils mit Nadel auf Spitze, teils mit einer zwischen Zapfen gelagerten Nadel, teils mit einem astatischen, an Kokonfäden aufgehängten Nadelsystem konstruiert.

Da solche Galvanoskope meist mit Widerstandsmeßbrücken verbunden sind, werden wir Abbildungen derselben der Besprechung dieser Anordnungen beifügen.

f) Elektrodynamometer und Wechselstrommesser.

Das Elektrodynamometer besteht aus einer festen und einer beweglichen Stromwickelung, bei welchen die an der letzteren durch den Strom hervorgerufene Drehung beobachtet und als Maß der Stromstärke benutzt wird. Dieses Instrument hat die wichtige Eigenschaft, daß es auch zur Messung von Wechselströmen benutzt werden kann, während das Galvanometer sich

nur für Gleichstrom eignet und bei Wechselstrom versagt. Anfangs diente das Elektrodynamometer zu einem bestimmten Zweck der Gleichstrommessung, später aber beinahe nur zur Wechselstrommessung.

Elektrodynamometer von W. Weber[1]). Dasselbe wurde 1846 von W. Weber konstruiert zu dem Zweck der Prüfung der elektrodynamischen Versuche und des aus denselben abgeleiteten Grundgesetzes von Ampere. Diese Prüfung war notwendig, weil Amperes Versuche mit festen und beweglichen Stromdrähten, wegen starker Reibungswiderstände, ungenau und von Strommessungen nicht begleitet waren; Weber wiederholte diese Versuche in viel genauerer Art und erhielt eine glänzende Bestätigung des Ampereschen Gesetzes.

Statt der Stromdrähte verwendete Weber Stromrollen mit vielen Windungen, deren gegenseitige Wirkungen aus den Dimensionen und der Windungszahl nach dem Ampereschen Gesetz berechnet und mit den Beobachtungen verglichen wurden.

Die bewegliche, d. h. drehbare Rolle, sogenannte Bifilarrolle, war an zwei Drähten aufgehängt, ähnlich wie die großen Magnetometer von Gauss; die Richtkraft dieser Aufhängung, bei welcher die Torsion der Drähte nur eine nebensächliche Rolle spielt, konnte aus den Dimensionen berechnet, die Torsionskraft aus Beobachtungen bestimmt werden. Die beiden Drähte derselben dienten zur Zu- und Ableitung des Stromes.

Derselbe Strom, der durch die Bifilarrolle ging, wurde durch eine feste Stromrolle geschickt, welche in verschiedene Lagen und Entfernungen von der beweglichen Rolle gebracht wurde. Die Ablenkungen der Bifilarrolle wurden mittels Spiegelablesung gemessen.

Außerdem ließ sich die feste Stromrolle die bewegliche umgebend aufstellen, so daß beide Rollen denselben Mittelpunkt erhielten und ihre Windungsebenen senkrecht zueinander standen. Das auf diese Weise entstandene Meßinstrument nannte Weber Elektrodynamometer und benutzte dasselbe später auf mannigfache Art, auch zur Messung von Wechselströmen; so wies er z. B. nach, daß die Schwingungen eines tönenden Magnet-

[1]) Pogg. Ann. 73, 194 (1848).

stabes in zweckmäßig angeordneten Drahtrollen Wechselströme erzeugten — ein Vorbild des Telephons!

Das Webersche Elektrodynamometer stellen Fig. 46 und 47 auf S. 70 und 71 dar.

cc ist die Bifilarrolle, die beiden Aufhängungsdrähte *nm*, *nm*, welche in *a*, *a'* den Strom aufnehmen; dieselbe ist durch einen offenen Rahmen *ll'*, der in der Fig. 47 sichtbar ist, an dem Stück *mm* befestigt und trägt zur Beobachtung den Spiegel *ff*. Die feste Rolle *yy* liegt senkrecht zu der Bifilarrolle; der Strom sucht die letztere parallel zu der festen Rolle zu stellen und übt in der senkrechten Lage das stärkste Drehungsmoment aus.

Die Ablenkung der Bifilarrolle ist bei Gleichstrom, außer von dem Strome der festen Rolle, auch vom Erdmagnetismus abhängig. Die erstere Wirkung bleibt aber dieselbe, wenn in beiden Rollen die Stromrichtung umgekehrt wird, während die Wirkung des Erdmagnetismus bei Umkehrung des Stromes der Bifilarrolle ihre Richtung ändert; wenn also der Strom rasch und in regelmäßiger Folge seine Richtung umkehrt, d. h. Wechselstrom in beide Rollen geschickt wird, so hebt sich die Wirkung des Erdmagnetismus auf und die Ablenkung wird proportional dem Quadrat des Stromes, wenn in beiden Rollen derselbe Strom oder Zweige desselben fließen, und proportional dem Produkt der beiden Ströme, wenn dieselben von verschiedenen Stromquellen herrühren.

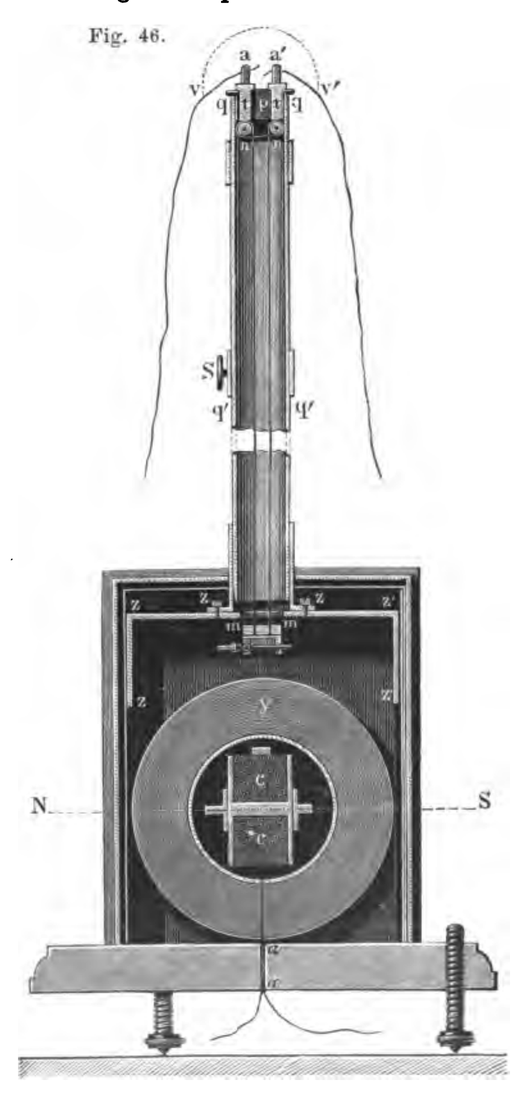
Verfolgen wir nun die Entwickelung zunächst des Spiegelelektrodynamometers, dann diejenige der gröberen, ohne Spiegelablesung arbeitenden, aber ebenfalls auf dem Weberschen beruhenden Elektrodynamometer.

Nach W. Weber konstruierte F. E. Neumann ein auf anderem Prinzip beruhendes Spiegelelektrodynamometer, s. Fig. 48, ohne indes etwas darüber zu veröffentlichen.

Bei diesem Instrumente, das in großen Dimensionen ausgeführt war, bilden zwei an den Enden eines Holzstabes *b* befestigte Stromrollen *rr* das bewegliche, mit Spiegel und bifilarer Aufhängung versehene System, während zu den Seiten jeder der beiden Stromrollen zwei feste Stromrollen $r_1 r_1, r_2 r_2$ gelagert sind. Diese Kombination gibt jedenfalls bedeutend höhere Empfindlichkeit wegen der Nähe der aufeinander wirkenden Stromrollen, ist aber ohne eine starke Dämpfung nicht leicht brauchbar.

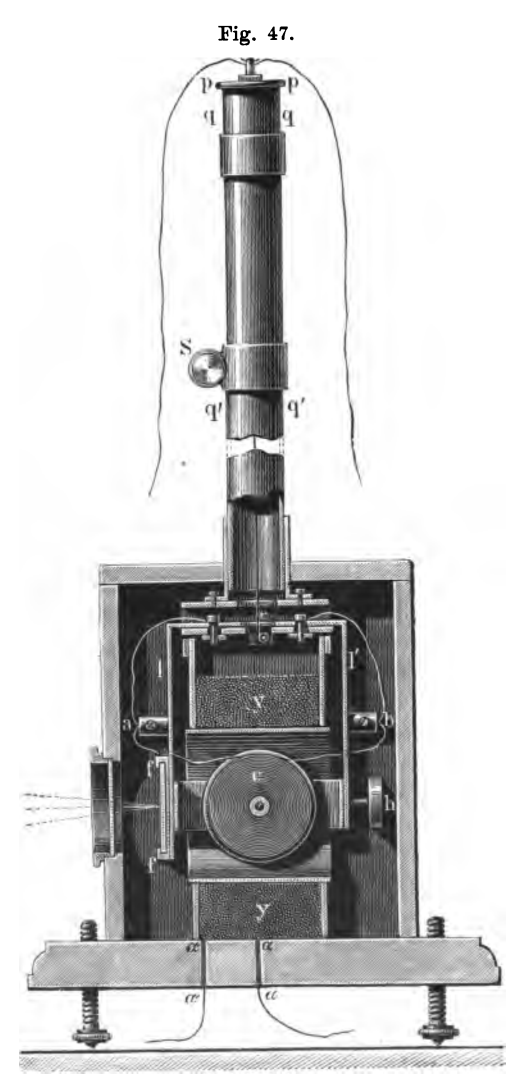
Obschon das Elektrodynamometer in den Händen von W. Weber wichtige Dienste leistete, konnte dasselbe als Gleichstrommesser in bezug auf Empfindlichkeit sich nicht mit dem Gal-

Fig. 46.



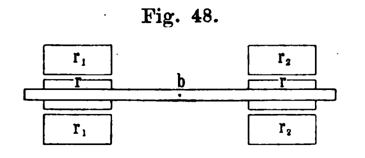
vanometer unter gleichen Umständen vergleichen; es ist dies teils in der Natur der elektrodynamischen im Vergleich zu der elektromagnetischen Wirkung, teils in dem Umstande, daß die Lage

Fig. 47.



der beweglichen Stromrolle, in welcher beobachtet wird, mit der weitesten Entfernung von der festen Stromrolle zusammenfällt, und auch in der bifilaren Aufhängung, welche sich als das natürlichste Mittel zur Zu- und Abführung des Stromes darbot, begründet.

Fig. 48.



Spätere Elektrodynamometer. Als das Bestreben nach größerer Empfindlichkeit dieses Instrumentes auftrat, gaben der Verfasser[1]) und später J. Fröhlich[2]) die Theorie des kugelförmigen Elektrodynamometers, bei welchem sowohl die feste als die bewegliche Rolle des Weberschen Instrumentes durch bewickelte Kugelflächen ersetzt waren; es wurde dadurch erreicht, daß in der Lage, in welcher das Instrument gebraucht wurde, die aufeinander wirkenden Windungen einander ebenso nahe standen, wie im Galvanometer Wickelung und Magnet.

Elektrodynamometer, welche empfindlicher waren als diejenigen der Weberschen Zeit und infolge kleinerer Dimensionen rascher arbeiteten, konstruierten beinahe gleichzeitig F. Kohlrausch[3]) und der Verfasser[4]), der erstere auf Grund der Weberschen Kombination, der letztere auf Grund der kugelförmigen Anordnung. Das letztere Instrument war an einem dünnen Draht aufgehängt, die Stromabführung erfolgte nach unten durch eine freie Torsionsfeder; Flügel, welche sich in Wasser bewegten, dämpften die Schwingungen.

Kohlrausch und seine Mitarbeiter verwendeten das von ihm konstruierte Instrument namentlich zur Widerstandsmessung von Elektrolyten mittels Wechselstrom; später wurde dasselbe durch das viel handlichere und empfindlichere Telephon ersetzt.

Mit dem Instrumente des Verfassers wurden unter anderem auf der Pariser elektrischen Ausstellung 1881 die in dem damals neuen Telephon kreisenden elektrischen Ströme gezeigt.

Bereits in der ersten Zeit der Konstruktion von feineren Galvanometern hatte man auch versucht, eine Eisennadel statt

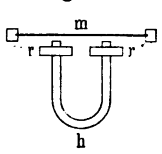
---

[1]) Pogg. Ann. **143**, 643 (1871).
[2]) Pogg. Ann. (N. F.) **8**, 563 (1879).
[3]) F. Kohlrausch, Hartm. u. Br., Nr. 378.
[4]) Siemens u. Halske, Elektrotechn. Zeitschr. 1881, S. 14.

einer Magnetnadel in das Galvanometer einzuhängen, und hatte auch bei Wechselstrom Ablenkungen nach einer Seite gefunden, da das Eisen durch den Wechselstrom abwechselnd magnetisiert wird; ein solches Instrument war also eigentlich auch ein Elektrodynamometer; diese Beobachtung führte später zu dem Elektrodynamometer von Bellati.

Andere Instrumente für Wechselstrom. Bei dem Telephon, s. Fig. 49, in welchem die ankommenden Wechselströme in so wunderbarer Weise Schwingungen der Blechmembran und Töne erzeugen, ist die Wirkung eine andere. Hinter der eisernen Blechmembran *m* liegen die Pole eines Stahlmagnets *h*; das Blech bildet den Anker desselben, wird magnetisiert und dauernd angezogen. Die aus der Leitung kommenden Stromimpulse, die in den Drahtröllchen *ff* um die Magnetpole kreisen, verstärken oder schwächen den Magnetismus derselben, je nach ihrer Richtung; die bereits vorhandene Anziehung des Bleches wird also bzw. vermehrt oder vermindert; durch einen regelmäßigen Wechselstrom entstehen daher Schwingungen, die wir als Ton oder Geräusch empfinden. Es erfolgt also nicht eine dauernde Ablenkung, wie beim Elektrodynamometer oder Eisengalvanometer, sondern es entstehen, dem Wechselstrom entsprechend, taktmäßige Schwingungen.

Fig. 49.



Das Telephon bildet deshalb ein vorzügliches und sehr handliches Mittel, um das Vorhandensein oder die Abwesenheit von Wechselströmen zu konstatieren; es wird daher zu der Widerstandsmessung von Elektrolyten, die in der neueren Elektrochemie so wichtig sind, seit der Einführung durch Kohlrausch allgemein benutzt.

Um solche Messungen auch trotz äußerer Geräusche und unempfindlicher Ohren auszuführen und die Empfindlichkeit zu vergrößern, entstanden später das optische Telephon von M. Wien[1]), bei welchem die Schwingungen der Membran auf einen Spiegel übertragen und durch die Bewegung eines Lichtbildes sichtbar gemacht wurden, und das Vibrationsgalvanometer von Rubens[2]), welches die durch Wechselströme hervor-

---

[1]) Wied. Ann. **42**, 593 (1890).
[2]) Ebend. **56**, 27 (1895).

gebrachten Schwingungen einer gespannten Stahlsaite optisch wiedergab.

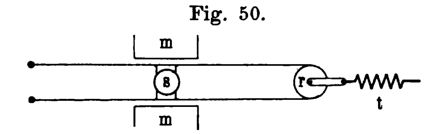
Bei diesen Instrumenten lassen sich die Amplituden der Lichtbildschwankungen auch messen; indessen besteht der Hauptwert dieser Instrumente in ihrer Verwendung bei Nullmethoden, d. h. bei Methoden, die auf der Abwesenheit von Strom in einem Stromzweige beruhen.

Bereits vorher waren die durch Ströme erregten Schwingungen des Telephons, optisch vergrößert, sichtbar gemacht und photographiert worden durch den Verfasser [1]), jedoch zu einem anderen Zweck, nämlich zur Darstellung von Kurven elektrischer Ströme, namentlich von Wechselströmen. Seither sind zu demselben Zweck mehrere Instrumente, sogenannte Oszillographen, konstruiert worden, welche wir in einem besonderen Abschnitt behandeln.

Hier, wo es sich nur um die Wechselströme anzeigenden magnetelektrischen Kombinationen handelt, heben wir noch Blondels Schleife oder Bifilargalvanometer hervor, welche sich vor den oben genannten Apparaten dadurch auszeichnet, daß die Eigenschwingungen des schwingenden Körpers beinahe gar nicht zur Wirkung kommen, und daher die Wechselstromkurven reiner wiedergegeben werden, als bei den vorstehend beschriebenen Apparaten.

Zwischen den Polen *mm* eines Magnets oder Elektromagnets, s. Fig. 50, ist ein an zwei Punkten befestigter Phosphorbronzedraht mittels der Rolle *r* und der Feder *t* ausgespannt und trägt

Fig. 50.



den in der Mitte an beiden Drahthälften befestigten Spiegel *s*. Wenn der Strom durch den Draht geht, bewegt sich die eine Drahthälfte nach unten, die andere nach oben, und der Spiegel erhält eine Neigung proportional der Stromstärke; ein von demselben reflektiertes Lichtbild kann daher die Kurve eines durch den Draht gehenden Wechselstromes wiedergeben. Die Schwingungsdauer

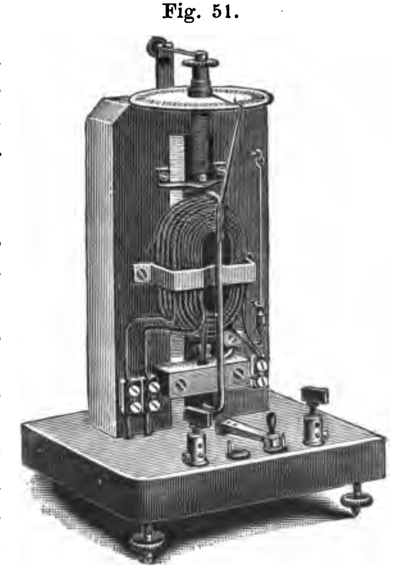
[1]) Elektrotechn. Zeitschr. 1889, S. 345.

der Drahthälften kann, durch Anziehen der Feder t bis beinahe zum Reißen des Drahtes so klein gemacht werden, daß dieselbe im Verhältnis zu derjenigen des Wechselstromes beinahe verschwindet; infolgedessen verlaufen die Eigenschwingungen des Drahtes sehr rasch und verzerren das Bild der Wechselstromkurven beinahe gar nicht.

Technische Elektrodynamometer: Siemens, Thomson. Wir verfolgen nun kurz die Dienste, welche das Elektrodynamometer der Elektrotechnik während deren Entwickelung geleistet hat.

Als man anfing, durch elektrische Maschinen stärkere Gleichströme zu erzeugen, und durch dieselben namentlich stärkere Bogenlichter herzustellen, war der einzige vorhandene Strommesser, der sich zum Gebrauch im Maschinenlaboratorium eignete, die Tangentenbussole. Wie wir S. 38 angedeutet haben, waren es namentlich die Störungen durch benachbarte Ströme und die damalige Mangelhaftigkeit der Spitzen, welche zur Aufhängung der Nadel dienten, welche die dauernde Benutzung dieses Instrumentes verhinderten.

Fig. 51.



Da war es die Konstruktion des Torsionselektrodynamometers durch W. Siemens, s. Fig. 51, welche der Not abhalf und die Messungen auf eine sichere Grundlage stellte; dasselbe hat sich auch noch bis in die achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts im Gebrauch der Elektrotechniker erhalten und wurde erst nach der Aufstellung der absoluten elektrischen Maßeinheiten durch das Torsionsgalvanometer und die neueren Instrumente verdrängt.

Dieses Instrument beruht auf dem zuerst in der Coulombschen Drehwage benutzten Prinzip, nach welchem der bewegliche

Teil durch Drehung einer Torsionsfeder in die Nulllage zurückgebracht wird und der abgelesene Torsionswinkel das Maß des Stromes bildet. Das Instrument ist also ein solches mit konstanter Lage der wirkenden Teile. Die elektrodynamische Kombination ist diejenige des Weberschen Elektrodynamometers, indem als fester Teil eine ovale Wickelung von dicken Drähten, ohne Rahmen, als beweglicher Teil eine einzige Windung, ebenfalls von dickem Draht, diente, welche senkrecht zu den festen Windungen über denselben gelagert war und den Strom durch Quecksilbernäpfe, welche in der Drehachse lagen, erhielt. Die bewegliche Windung war aufgehängt an einem dicken Faden und einer um denselben angeordneten kräftigen Torsionsfeder; zu oberst an dem Instrumente befand sich eine kreisförmige, horizontale Skala und in deren Mittelpunkte ein drehbarer Knopf, an welchem unter der Skala das Ende der Torsionsfeder, über der Skala der über derselben bewegliche Torsionszeiger saßen. Über der Skala spielte ferner ein an der beweglichen Windung befestigter Stromzeiger. Ohne Strom zeigten beide Zeiger auf Null; trat Strom ein, so bewegte sich der Stromzeiger seitwärts, und der Torsionszeiger wurde nach der entgegengesetzten Seite so lange gedreht, bis der Stromzeiger wieder auf Null zurückkam. Der abgelesene Torsionswinkel gab ein Maß für das Quadrat des Stromes. Dieses Maß auf Ampere zurückzuführen, konnte damals nicht geschehen, weil es noch keine Ampere gab; es genügte, daß dieses Maß sicher und mit der Zeit nicht veränderlich war. Die Angaben des Instrumentes waren in hohem Grade unabhängig von Störungen durch benachbarte Ströme, Magnete, Eisenmassen usw.

Den Wert dieses ersten Instrumentes für Maschinenströme, durch welches der vorhergehende, im wesentlichen messungslose Zustand beseitigt wurde, können eigentlich nur diejenigen schätzen, welche in dem damaligen Stadium der Elektrotechnik selbst mitarbeiteten. Der Meßbereich wurde so eingerichtet, daß er für die damaligen Lichtbogenströme ausreichte.

Mit der allgemeinen Einführung des absoluten elektrischen Maßsystems, 1881, fand auch der Gedanke, die gegenseitige Wirkung zweier Ströme nur durch die Schwerkraft, unabhängig von Magnetismen, zu messen, d. h. elektrodynamische Wagen zu konstruieren, neue Nahrung, nachdem er bereits in der ersten Zeit der Konstruktion von Strommessern

versucht worden war, s. S. 34, und wurde durch die führenden Geister, Helmholtz und Sir W. Thomson (Lord Kelvin) ausgeführt.

Das Helmholtzsche Instrument war nur zum Gebrauch in wissenschaftlichen Laboratorien bestimmt, das Kelvinsche dagegen mehr für Normalmessungen in der Elektrotechnik; wir beschreiben kurz das letztere.

Das Prinzip ist dasselbe wie bei dem Neumannschen Spiegelelektrodynamometer, s. S. 69. Das bewegliche System besteht aus zwei an den Enden eines Stabes befestigten Stromrollen, das feste aus vier Stromrollen, von denen je zwei zu beiden Seiten einer beweglichen Rolle gelagert sind; alle Wirkungen sind durch zweckmäßige Wahl der Stromrichtungen in den Rollen so angeordnet, daß sie die Drehung des beweglichen Systems in demselben Sinne bewirken und zugleich die Wirkung des Erdmagnetismus und ähnliche aufheben. Es soll aber nicht der Ausschlag des beweglichen Teiles gemessen, sondern nach Eintritt des Stromes das bewegliche System durch Auflegen von Gewicht in die Nulllage zurückgebracht werden, wie bei einer Wage. Es ist also ein Instrument mit konstanter Lage, wie so manche andere für genaue Messung bestimmte.

Fig. 52 zeigt eine solche „Centiamperewage", die mit Hilfe eines zusätzlichen Widerstandskastens auch zu Spannungsmessungen benutzt werden kann.

Man sieht in der Figur die beiden obersten festen Stromrollen; die beiden unter diesen angeordneten, beweglichen und die beiden unteren, festen Stromrollen liegen hinter der Skala. Die Stromzuführung zu den beweglichen Rollen geschieht durch zwei Reihen nebeneinander vertikal ausgespannter, feiner Drähte, welche zugleich die Aufhängung des beweglichen Systems bilden, ähnlich der Federaufhängung eines Uhrpendels.

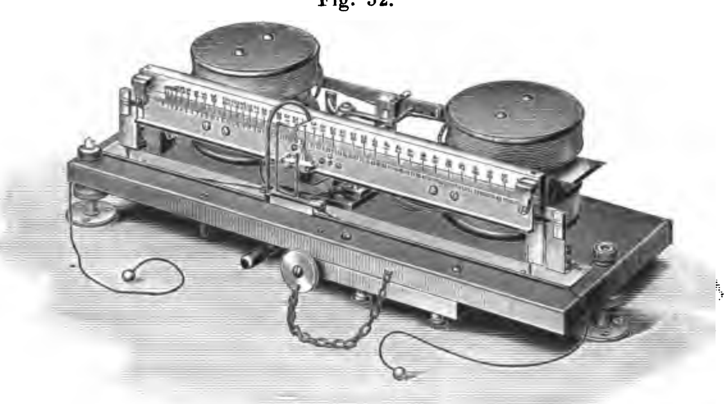
Auf den Wagebalken kann an bestimmter Stelle ein Gegengewicht, welches einer runden Anzahl von Ampere entspricht, aufgelegt, und ein Laufgewicht, ähnlich wie die Milligramme an einer chemischen Wage, längs des Armes verschoben werden; an dem Laufgewichte sitzt ein Zeiger, dessen Lage auf der am Wagebalken angebrachten Skala abgelesen wird, und, in Verbindung mit der Größe des Gegengewichtes, direkt den Strom in Ampere angibt. Diese Wage kann auch für Wechselstrom benutzt werden.

Wenn auch die „Wägung“ des Stromes ihre Vorteile hat, so steht ihrer allgemeinen Anwendung, ebenso wie bei den Torsionsinstrumenten, die Notwendigkeit einer Einstellung, welche Zeit und Sorgfalt in Anspruch nimmt, entgegen.

Kehren wir zu der Entwickelung der Elektrodynamometer in der Elektrotechnik zurück.

Wie wir gesehen haben, wurde im Anfange der Maschinenentwickelung ein solches Instrument für Gleichstrommessung benutzt, weil damals die Magnete enthaltenden Instrumente weder praktisch noch sicher genug waren. Als bessere Instrumente der letzteren Art auftraten, wurde das erstere Instrument mehr und

Fig. 52.



mehr aus der Gleichstrommessung verdrängt, während es in der Wechselstrommessung noch geraume Zeit gute Dienste leistete.

Mitbestimmend war hierbei auch der Umstand, daß man anfing, auch Gleichstromspannungen zu messen, wofür sich das Siemenssche Elektrodynamometer, wenigstens ohne Umänderung, nicht eignete, weil es starken Stromes bedurfte, während der zur Spannungsmessung verwendete Strom möglichst schwach sein muß, um den Hauptstrom möglichst wenig zu verringern.

Energiemessung mittels Elektrodynamometer. Eine neue Anwendung des Elektrodynamometers, nachdem dasselbe mit dünnerer Wickelung und Stromzuführung durch Drähte, statt Quecksilbernäpfe, eingerichtet war, ergab sich, als ungefähr gleich-

zeitig Ayrton und der Verfasser[1]) darauf aufmerksam machten, daß mit dem Elektrodynamometer direkt die elektrische Energie, zunächst bei Gleichstrom, gemessen werden könne, wenn man den Hauptstrom oder einen bekannten Teil desselben, z. B. in die feste Wickelung, und einen der Spannung entsprechenden Strom in die bewegliche Wickelung schickte; die Wirkung am Elektrodynamometer war dann proportional dem Produkt: Strom × Spannung, d. h. der elektrischen Energie zwischen zwei bestimmten Punkten des Stromkreises.

Für Gleichstrom wurde diese Methode indessen wenig angewandt, da man auch zu diesem Zweck einen Strom- und einen Spannungsmesser ablesen und die Ergebnisse miteinander multiplizieren konnte.

Bei Wechselstrom jedoch sollte dieselbe später allgemeine Anwendung finden, weil in diesem Falle die wirkende Kraft am Elektrodynamometer bei konstanter Lage proportional $JP \cos \varphi$ ist, wo J den Strom, P die Spannungsdifferenz, φ den Phasenunterschied zwischen Strom und Spannung, d. h. die Zeitdifferenz zwischen einer elektrischen Welle der Stromstärke und einer solchen der Spannung, bezeichnen, und weil dieser Ausdruck zugleich denjenigen der elektrischen Energie zwischen den beiden Punkten des Stromkreises, an welchen die Spannungsdifferenz gemessen wird, bedeutet. Das Elektrodynamometer eignet sich daher vorzüglich zu Energiemessungen bei Wechselstrom.

Mit dem Elektrodynamometer lassen sich alle nötigen Wechselstrommessungen durchführen, nämlich diejenige des Stromes oder eines bekannten Teiles des Stromes, indem beide Wickelungen hintereinander in den betreffenden Strom eingeschaltet werden, diejenige der Spannungsdifferenz an zwei Punkten des Stromkreises, indem ein Teil des Hauptstromes von diesen Punkten aus durch die beiden Wickelungen hintereinander geführt wird, und diejenige der Energie E, wie bemerkt. Die auf die bewegliche Wickelung wirkende elektrische Kraft ist im ersten Falle proportional J^2, im zweiten Falle proportional P^2, im letzten Falle proportional E; dividiert man ferner die Energie durch das Produkt: Strom × Spannung, so erhält man $\cos \varphi$ und daraus die Phasendifferenz φ.

---

[1]) Frölich, Elektrotechn. Zeitschr. 1883, S. 73.

Hier bedeuten „Strom“ und „Spannung“ Mittelwerte dieser Größen.

Verfolgen wir nun kurz die Entwickelung des Elektrodynamometers in der neueren Elektrotechnik.

Neuere technische Elektrodynamometer. Bei dieser Entwickelung zeigt sich nun deutlich der Zug der Zeit. Die Messungen mit Einstellung einer Torsionsfeder oder Auflegung von Gewicht verschwanden, es wurden nur Instrumente mit direkter Ablesung konstruiert, meist mit beinahe aperiodischer Schwingung, und man suchte die Skalen möglichst proportional zu gestalten. Ferner mußte eine Forderung, die für genauere Wechselstrommessungen gilt, erfüllt werden, nämlich Unabhängigkeit von der Periodenzahl und der Wellenform des Wechselstromes.

Als elektrische Kombination wurde mehrfach die von W. Weber angegebene, mit zwei in der Nulllage aufeinander senkrecht stehenden Rollen, benutzt, z. B. bei den Instrumenten von Siemens u. Halske (astatisches Elektrodynamometer), Lord Kelvin, Fleming u. Girmingham, Weston, der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft, dem älteren von Hartmann u. Braun, Carpentier usw.

Die Skalen dieser Instrumente sind zum Teil für Messung von Strom oder Spannung ziemlich proportional. Es ist dies möglich, wenn man eine oder beide Spulen so gestaltet, daß bei demselben Strom, aber bei verschiedener Lage, das Drehungsmoment mit der Entfernung aus der senkrechten Lage stark abnimmt; allein eine Skala, die aus theoretischen Gründen bei genauer Ausführung proportional sein muß, wurde auf diese Weise nicht erreicht; man erhielt größere oder geringere Annäherung an Proportionalität, dem Charakter nach blieb die Skala eine empirische.

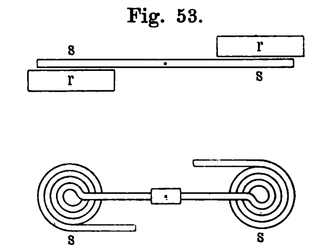
Zur Erreichung der Aperiodizität wurden, wie bei anderen Instrumenten, starke Dämpfungen durch Luft- oder Flüssigkeitswiderstand, oder eine elektrische, verwendet.

Es sind aber auch statt der Weberschen Kombination andere zugrunde gelegt worden.

Wir erwähnen zunächst diejenigen, welche sich an die Anordnung der Wage von Lord Kelvin anlehnen.

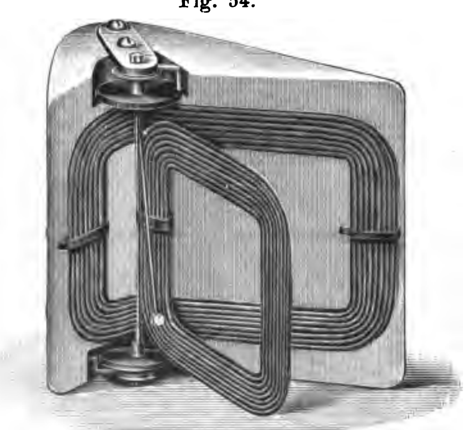
Bei dem Elektrodynamometer von Parr [1]) wirken zwei feste Wickelungen auf zwei bewegliche, die an den Enden eines drehbaren Stabes sitzen, s. Fig. 53; alle Wickelungen haben die Form einer Drahtspirale. In der Ruhelage legen sich die beweglichen Spiralen ziemlich dicht an die festen an; die Stromrichtungen sind so gewählt, daß durch den Strom Abstoßung erfolgt. Die entgegenwirkende mechanische Richtkraft wird durch Uhrfedern bewirkt; die Skala ist einigermaßen proportional.

Fig. 53.



Bei dem neueren Elektrodynamometer von Hartmann und Braun sind ebenfalls zwei bewegliche und zwei feste Wickelungen von je einer Drahtlage benutzt. Die Wickelungen haben die Form eines Drahtvierecks von mehreren Windungen, s. Fig. 54,

Fig. 54.



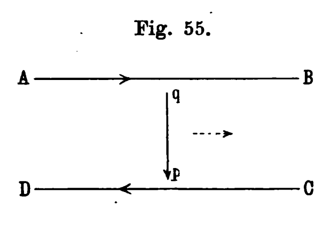
und zwar sind die festen Vierecke länger als die beweglichen und außen derart umgebogen, daß die Proportionalität der Skala für Strom oder Spannung annähernd erreicht wird.

Ein anderes Prinzip ist dem Elektrodynamometer von Siemens u. Halske zugrunde gelegt; dasselbe bedeutet eine Art Über-

[1]) Parr, Elektr. Eng. Measuring Instruments 1903, p. 71.

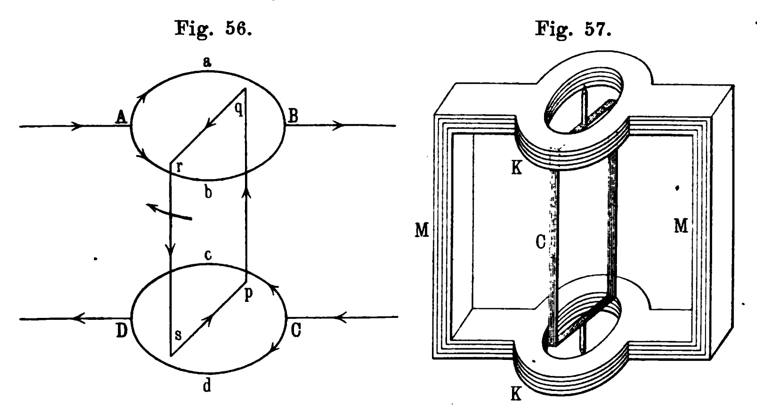
tragung des Thomsonschen oder Deprez-d'Arsonvalschen Drehspulenprinzips auf Wechselstrom. Wenn (s. Fig. 55) ein vertikaler, beweglicher Stromdraht pq sich zwischen zwei horizontalen Stromlinien AB, CD, deren Ströme entgegengesetzt gerichtet sind, befindet, so wird derselbe, wenn die Pfeile die Stromrichtungen bedeuten, abgestoßen in horizontaler Richtung, und zwar überall mit gleicher Kraft, wenn die Linien AB, CD sehr lang sind.

Fig. 55.



Ist nun $pqrs$ die Drehspule, und werden, s. Fig. 56, die Stromlinien AB und CD über derselben in je zwei runde Zweige AaB, AbB und CcD, CdD geteilt, so treiben AaB und CcD den senkrechten Teil pq und AbB und CdD den Teil rs der

Fig. 56. Fig. 57.



Drehspule so, daß die Drehspule sich in der Richtung des Uhrzeigers dreht. Kehren sich alle Ströme um, so bleibt die Wirkung dieselbe.

Fig. 57 zeigt die allgemeine Disposition des Instrumentes. Die feste Wickelung M besteht aus Kupferblechstreifen, welche oben und unten die halbkreisförmigen Arme K bilden; C ist die Drehspule, die namentlich von den Armen K in Drehung gesetzt wird.

Zur Dämpfung der Schwingungen wird der Luftwiderstand benutzt, den eine mit der Drehspule durch r verbundene

Scheibe *B* bei der Bewegung in einem einseitig geschlossenen Rohr *T* findet, s. Fig. 58.

Diese Kombination hat den wichtigen Vorteil für den Fabrikanten, daß dieselben Drehspulen, Aufhängungen, Lagerungen usw benutzt werden können, wie in den Drehspulgalvanometern für Gleichstrom.

Fig. 58.

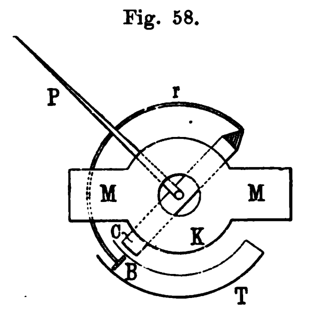
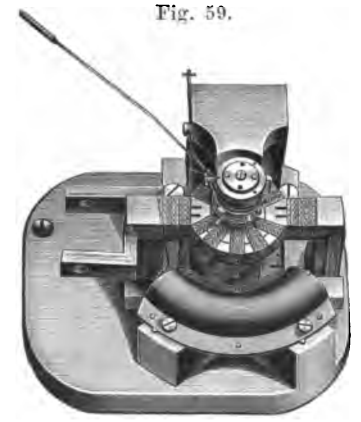


Fig. 59 stellt das Innere eines solchen Instrumentes dar. Man sieht vorn das kreissegmentförmige Rohr der Luftdämpfung, unter dem oberen Achsenlager die obere Spiralfeder, und die feste, wie in Fig. 57 geformte feste Wickelung, links den an der Drehspule sitzenden Zeiger.

Die Skala ist im wesentlichen quadratisch für Strom und Spannung, proportional für Energie.

F e r r a r i s - I n s t r u m e n t e. Den Ausgangspunkt für eine neue Entwickelung in den Instrumenten für Wechselstrom hat das 1888 erfundene F e r r a r i s - sche D r e h f e l d gebildet, dasselbe, welches die Grundlage der modernen Drehstrom- oder Mehrphasenstrommotoren geliefert hat; dieses Prinzip, in seiner Anwendung auf Meßinstrumente, hat nichts gemein mit den vorstehend beschriebenen Kombinationen und beruht auf der Entstehung von I n d u k t i o n s - s t r ö m e n.

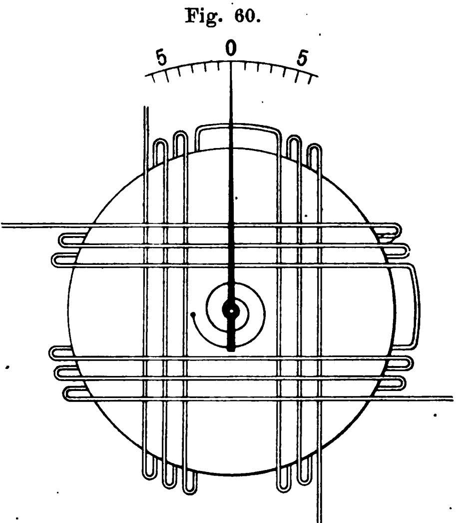
Fig. 59.



Wenn (s. Fig. 60) um eine drehbare Kupferscheibe zwei zueinander senkrecht stehende Drahtwickelungen angeordnet sind und durch jede Wickelung ein Wechselstrom fließt, so entstehen Induktionsströme in der Scheibe, deren Rückwirkung auf die Wechselströme in den Wickelungen die Scheibe in Bewegung versetzen kann. Haben

die beiden Wechselströme dieselbe Phase, d. h. treten die Maxima derselben gleichzeitig ein, so entsteht keine Bewegung. Sind die Phasen jedoch verschieden, d. h. treten die Strommaxima nicht gleichzeitig auf, so erfolgt eine Bewegung und zwar gerade so, als wenn eine der Wickelungen mit konstantem Strom um die Achse der Scheibe rotierte — daher der Name Drehfeld. Verhindert man die Scheibe an der Drehung, indem man eine Torsionsfeder zwischen ihrer Achse und einem festen Punkte anbringt, so wird die Scheibe nur abgelenkt, bis die ablenkende Kraft gleich der Spannung der Torsionsfeder ist. Der Winkel der Ablenkung ist dann ein Maß der ablenkenden Kraft, und diese ist proportional dem Produkte der in den beiden Wickelungen fließenden Ströme mit dem Sinus des Phasenunterschiedes derselben; die Wirkung ist am stärksten, wenn der Phasenunterschied 90° beträgt, d. h. ein Strommaximum um ein Viertel der Stromperiode vor oder hinter dem anderen Strommaximum erfolgt.

Fig. 60.



Um diese Erscheinung praktisch zu verwerten, müssen statt der Drahtwickelungen bewickelte Elektromagnete verwendet werden, weil alsdann die Wirkung bedeutend stärker ist. Statt jeder Drahtwickelung wird alsdann ein bewickelter hufeisenförmiger Elektromagnet so über die Kupferscheibe geschoben, daß dieselbe zwischen den Magnetpolen liegt; der Eisenkörper der Elektromagnete wird „lamelliert“, d. h. aus vielen dünnen, voneinander isolierten Eisenblechen hergestellt, um Erwärmung und Energieverluste im Eisen zu vermeiden.

Ferraris hat für sein Drehfeld zwei Anwendungen an-

gegeben, die eine zur Konstruktion von Drehstrommotoren, die andere zur Herstellung von Meßapparaten für mehrphasigen Wechselstrom. Die letztere scheint durch v. Dolivo-Dobrowolsky[1]) zur Konstruktion eines Phasenmessers zuerst durchgeführt worden zu sein; das Drehfeld läßt sich aber auch benutzen, um bei Wechselströmen Stromstärke, Spannung und elektrische Energie zu messen.

Man hat nämlich Mittel, um aus demselben Strome durch Teilung in zwei Zweige und Einsetzung einer bedeutenden Selbstinduktion in den einen Zweig den Phasenunterschied der beiden Zweigströme auf eine bestimmte Größe, z. B. 90°, zu bringen; läßt man alsdann den einen Zweigstrom durch die Wickelung des einen Elektromagneten, den anderen durch die Wickelung des anderen gehen, so ist der Sinus des Phasenunterschiedes gleich Eins, und das Drehungsmoment, das auf die Scheibe ausgeübt und durch die Ablenkung derselben gemessen wird, wird proportional dem Quadrate der Stromstärke.

Ebenso, wenn man die Spannungsdifferenz zwischen zwei Punkten eines Wechselstromkreises messen will, legt man zwischen dieselben einen möglichst wenig Selbstinduktion enthaltenden Zweig und einen zweiten mit so viel Selbstinduktion, daß der Phasenunterschied 90° wird und legt die beiden Elektromagnete bzw. in die beiden Zweige; dann wird die Ablenkung der Kupferscheibe proportional dem Quadrate der gesuchten Spannungsdifferenz.

Wenn endlich die elektrische Energie zwischen zwei Punkten des Stromkreises zu bestimmen ist, welche gleich dem Produkte: Strom × Spannung × $\cos\varphi$ ist, wo φ der Phasenunterschied zwischen Strom und Spannung, so schickt man den Hauptstrom in den einen Elektromagnet, in den anderen Elektromagnet dagegen einen Strom, dessen Phase um 90° verschieden ist von derjenigen der Spannung; dann ist der Sinus des Phasenunterschiedes:

$$\sin(90 - \varphi) = \cos\varphi,$$

und das Drehungsmoment proportional Strom × Spannung × $\cos\varphi$, also der Energie.

---

[1]) v. Dolivo-Dobrowolsky, Elektrotechn. Zeitschr. 1894, S. 350.

Man kann also mit einem nach diesem Prinzip angeordneten Instrumente dieselben Größen messen, wie mittels eines Elektrodynamometers, nämlich Strom, Spannung und Energie; mit Gleichstrom dagegen gibt das Instrument keine Wirkung, weil die Induktionsströme nur bei Wechselstrom entstehen.

Da mit Apparaten dieser Art nach Belieben die Drehung oder die Ablenkung der beweglichen Scheibe hervorgerufen werden kann, indem man im ersten Falle die Achse frei beweglich, oder, für den letzteren Fall, an einer Torsionsfeder befestigt, wie in Fig. 61, so kann dieselbe Disposition als Meßapparat oder als Elektrizitätszähler, sogenannter Induktionszähler, dienen.

S. 105, Fig. 80 und 81, wird ein solcher Induktionszähler und seine Justierung beschrieben; wir verweisen daher auf diese Beschreibung. Jedes Elektromagnetpaar dieses Zählers wirkt wie eine Drahtwickelung in Fig. 61; die Art, wie die beiden Ströme benutzt werden, um die Stromstärke oder die Spannung oder die Energie eines Wechselstromes zu messen, ist die vorstehend angegebene.

Da in den Ferrarisapparaten das Drehungsmoment proportional $\sin\varphi$, wo φ der Phasenunterschied der beiden Ströme ist, so können dieselben auch zur Messung des Phasenunterschiedes zwischen Stromstärke und Spannung bei einem Wechselstrome dienen; bei Anwendung von drei Elektromagneten, einem für die Stromstärke, zwei für die Spannung, aber in entgegengesetztem Sinne, gibt das Instrument durch Ablenkung nach rechts oder links an, ob der Strom hinter der Spannung oder die Spannung hinter dem Strome zurückbleibt (Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft).

Es gibt indessen auch Voltmeter und Amperemeter dieser Art, bei welchen nicht zwei bzw. vier Elektromagnete, sondern nur ein einziger zur Anwendung kommt; es müssen alsdann besondere Mittel angewendet werden, um überhaupt an dem beweglichen Metallkörper eine Ablenkung hervorzubringen.

Bei den Instrumenten von Westinghouse wird dies erreicht dadurch, daß dem Metallkörper eine besondere Form gegeben wird, bei denjenigen der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft dadurch, daß jeder Pol einen denselben zum Teil bedeckenden Metallschirm erhält, welcher die Entstehung von Induktionsströmen in dem beweglichen Metallkörper unter dem

Schirme verhindert und ein Drehungsmoment für den letzteren zustande kommen läßt.

Wir haben oben gesehen, daß der Phasenunterschied zwischen Strom und Spannung aus den Messungen von Strom, Spannung und Energie berechnet werden kann; die elektrotechnische Praxis indessen hat oft das Bedürfnis, denselben direkt zu messen; es sind daher hierfür besondere Instrumente, sogenannte Phasenmesser, entstanden (s. S. 85).

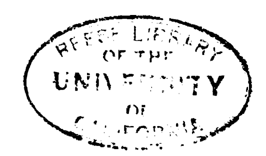
Im allgemeinen muß noch bemerkt werden, daß die auf dem Ferrarisschen Drehfelde beruhenden Instrumente von der Periodenzahl des Wechselstromes abhängen, während dies bei den dynamometrischen Apparaten nicht der Fall ist; für genaue Messungen sind daher die letzteren vorzuziehen.

Spannungsmesser.

Für den Bereich der gewöhnlichen elektrischen Spannungen (Niederspannung) bedarf die Messung derselben nicht besonders zu diesem Zweck konstruierter Instrumente, sondern kann durch solche erfolgen, wie sie zur Strommessung gebraucht werden; es wurde dies bereits bei der Besprechung des Torsionsgalvanometers (s. S. 41) erörtert.

Wenn die Spannung durch die Ablenkung eines Instrumentes gemessen werden soll, so können Strommesser direkt benutzt werden; denn nach dem Ohmschen Gesetz ist die an den Enden eines von Strom durchflossenen Instrumentes herrschende Spannung gleich dem Produkte des Stromes mit dem Widerstand des Strommessers, also proportional dem Strome; die Stromskala des Instrumentes kann also ohne weiteres durch eine Spannungsskala ersetzt werden, und man hat nur die Wickelung so zu wählen, daß der gewünschte Bereich der Spannung von dem Instrumente beherrscht wird.

Soll die Spannung durch Kompensation mit einer bekannten Spannung gemessen werden, z. B. derjenigen einer Normalbatterie, so wird ein Galvanometer in den Zweig, dessen



Spannung zu messen ist, eingeschaltet, und die Widerstandsverhältnisse in den anderen Zweigen und die Verzweigung der Schaltung so gewählt, daß das Galvanometer keinen Strom anzeigt; dann ist die gesuchte Spannung gleich derjenigen, welche an den Enden des das Galvanometer enthaltenden Zweiges herrscht, und läßt sich aus der Spannung der Normalbatterie und den Widerstandsverhältnissen berechnen. Man bedarf also in diesem Falle zum Behuf der Spannungsmessung eines Galvanometers.

Fig. 61.



Näheres hierüber in dem Abschnitt: Methoden der Spannungsmessung.

Wir haben also hier nur diejenigen Fälle zu erwähnen, in welchen Spannungen durch eigens zu diesem Zweck konstruierte Instrumente gemessen wurden.

Hierher gehört vor allem das Gebiet der Hochspannung, oder derjenigen Spannungen, die bereits leicht sichtbare Funken zu erzeugen vermögen, d. h. von etwa 1000 Volt an, also sowohl der Spannungen, die bei der Elektrisiermaschine und den ihr verwandten Apparaten vorkommen, als auch der atmosphärischen Elektrizität, und ferner auch der in der Neuzeit durch Wechselstrommaschinen erzeugten hohen Spannungen.

Elektrostatische Spannungsmesser. Wir verfolgen auch hier die Entwickelung dieser Instrumente chronologisch.

Die ältesten Spannungsmesser sind die Elektroskope und Elektrometer, welche bei der Elektrisiermaschine, Leydener Flasche usw., also bei reibungselektrischen Versuchen angewendet wurden, namentlich die Goldblattelektroskope und -elektrometer. Dieselben dienten dazu, das Vorhandensein einer elektrischen Spannung und das Zeichen derselben, ob positiv oder

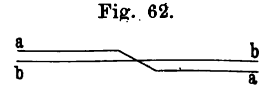
negativ, anzugeben, und entsprachen, im Gebiete des elektrischen Stromes, etwa den Galvanoskopen.

Das erste, eigentliche Meßinstrument für höhere elektrische Spannungen war die Coulombsche Torsionswage (1785), siehe Fig. 61. Die Einrichtung dieses Instrumentes besteht im wesentlichen in einem horizontalen, an einem langen feinen Draht d aufgehängten, sehr leichten Balken B, an dessen einem Ende der Körper, auf den eine abstoßende Kraft ausgeübt wird, hier ein elektrisiertes Kügelchen aus Holundermark, befestigt war, während das obere Ende des Aufhängedrahtes mit der Hand gedreht werden konnte. Die abstoßende Kraft wurde von der sogenannten Standkugel ausgeübt, d. h. von einer der beweglichen Kugel gleichen, fest aufgestellten, mit derselben Spannung elektrisierten Kugel; sowohl der Winkel, um welchen der Aufhängedraht tordiert wurde, als derjenige, um welchen die bewegliche Kugel abgelenkt war, konnten abgelesen werden.

Bei diesen Versuchen wirkte der elektrischen Abstoßung auf die bewegliche Kugel die Torsionskraft des Aufhängefadens entgegen, welche dem Torsionswinkel proportional ist. Es konnte also, bei verschiedenen gemessenen Entfernungen der beiden Kugeln, die erstere elektrische Kraft durch die letztere mechanische Kraft gleichsam abgewogen und auf diese Weise das Gesetz, nach welchem die elektrische Abstoßung mit der Entfernung abnimmt, bestimmt werden.

Um dieses Instrument für schwache elektrische Spannungen empfindlicher zu machen, ersetzte Dellmann (1842) den Wagebalken mit Kugel durch einen horizontalen Metalldraht b und die Standkugel durch einen festen horizontalen Draht a, welcher (s. Fig. 62) so geformt war, daß in der Ruhelage die beiden Hälften von a zu beiden Seiten von b und b parallel lagen. Als Aufhängedraht wurde ein isolierender Glasfaden benutzt.

Fig. 62.

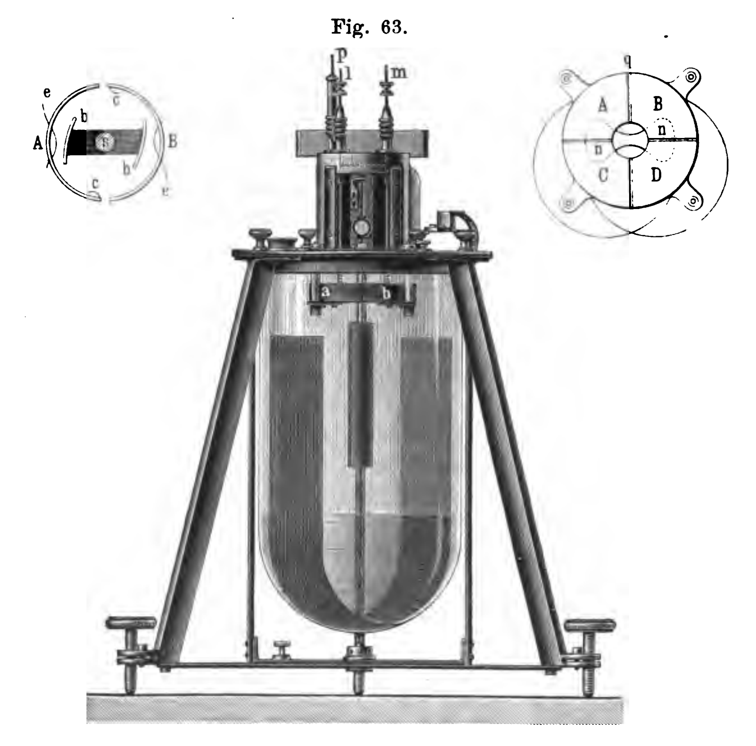


Eine andere Modifikation, in welcher der elektrischen Abstoßung der Magnetismus der Erde entgegenwirkte, gab R. Kohlrausch in seinem Sinuselektrometer[1]. Die Anordnung des festen und des beweglichen Teiles war dieselbe wie in dem Dell-

[1]) Pogg. Ann. 88, 497 (1853).

mannschen Apparat; allein der feste Stab konnte von außen um einen ablesbaren Winkel gedreht werden, und der bewegliche Draht war ersetzt durch eine auf Spitze spielende und mit Spiegel versehene Magnetnadel. Zuerst wurde die natürliche, durch die Richtkraft des Erdmagnetismus bestimmte Ruhelage der Magnetnadel bestimmt, dann der feste Stab mit der Nadel

Fig. 63.



elektrisch geladen und die hierdurch erfolgende Ablenkung der Nadel gemessen. Die ablenkende Kraft ist alsdann proportional dem Sinus der Ablenkung.

Auf eine viel höhere Stufe wurde die Messung schwacher elektrischer Spannungen gehoben durch das Quadrantenelektrometer von W. Thomson, welches vielleicht das sinnreichste elektrische Instrument genannt werden darf (s. Fig. 63).

Während die vorher konstruierten Elektrometer auf dem dy-

namischen Prinzip beruhten, d. h. auf der Abstoßung zweier gleicher elektrischer Ladungen, und daher die abstoßende Kraft proportional dem Quadrate der Spannung war, wird bei dem Quadrantenelektrometer der bewegliche Teil mit einer hohen konstanten Spannung geladen, der feste Teil mit der zu messenden Spannung; die ablenkende Kraft wird hierdurch proportional der letzteren Spannung selbst. Der Unterschied der beiden Prinzipien ist ähnlich wie bei den Elektrodynamometern und den Galvanometern. Die Steigerung der Empfindlichkeit beruht auf der Höhe der konstanten Ladung; hierdurch und durch Anwendung der Spiegelablesung wurde es möglich, Spannungen unter 1 Volt, welche nur bei galvanischen, nicht bei den stets hochgespannten reibungselektrischen Erscheinungen vorkommen, zu messen.

Die konstante Spannung wurde erzeugt durch eine geladene Leydener Flasche, deren äußere Belegung an Erde lag und in deren inneren Raum, der durch konzentrierte, zugleich die innere Belegung bildende Schwefelsäure trocken gehalten wurde, der ganze Meßapparat luftdicht eingeschlossen war. Um der Schwierigkeit, die Spannung der Leydener Flasche konstant zu erhalten, zu begegnen, war ein kleines Elektrometer in der Art der früheren Instrumente dieser Art angebracht, an welchem das Sinken der Spannung und das Steigen beim Wiederauffüllen der Ladung der Flasche beobachtet werden konnte, und eine Miniaturelektrisiermaschine, der „Replenisher“, welche gestattete, durch Drehung eines Körpers mit Metallbelegungen und durch Benutzung der eigenen elektrischen Spannung der Flasche die Ladung derselben zu ergänzen und stets auf derselben Höhe zu erhalten oder auch die Spannung zu vermindern.

Der eigentliche Meßapparat (s. die Einzelfigur rechts) bestand aus einer kreuzartig aufgeschnittenen Metalldose *ABCD*, in deren Inneren das nierenförmige, bewegliche, mit einem Spiegelchen verbundene Blech *nn* schwebte und an zwei feinen Drähten, also bifilar, aufgehängt war. An dieser beweglichen „Nadel“ saß ein feiner Draht, der durch ein starke Bewegungen verhinderndes Rohr hindurch bis in die Schwefelsäure hinab reichte, so daß die Nadel die Spannung der inneren Belegung der Flasche annahm. Von den Sektoren *A*, *B*, *C*, *D* waren je zwei gegenüberliegende miteinander verbunden; das eine Paar erhielt die zu messende elektrische Spannung, das andere war isoliert oder an Erde gelegt,

oder das eine lag am positiven, das andere am negativen Pol der zu messenden Elektrizitätsquelle. Die Nadel wurde von dem einen Sektorenpaar abgestoßen, von dem anderen angezogen; die Ablenkung wurde an der Skala der Spiegelablesung gemessen und war proportional der zu messenden Spannung.

Der „Replenisher“ (s. die Einzelfigur links) enthielt das Prinzip der Influenzelektrisiermaschine, bevor diese letztere bekannt war. Der innere drehbare, aus Horngummi bestehende Teil besitzt die voneinander isolierten Bleche *bb*; die festen metallischen Sektoren *A*, *B* sind mit den beiden Belegungen der Flasche verbunden; die Federchen *cc* sind untereinander verbunden, sonst isoliert; die Federchen *ee* liegen bzw. an *A*, *B*. Stoßen bei der Drehung die Bleche *bb* an die Federchen *cc*, so werden sie miteinander verbunden und, da sie den geladenen Blechen *A*, *B* gegenüberstehen, werden auf denselben entgegengesetzte Ladungen induziert. Beim Weiterdrehen wird ihre Verbindung aufgehoben, und wenn die Bleche *b*, *b* an *e*, *e* stoßen, werden ihre Ladungen an die Belegungen der Flasche abgegeben, so daß deren Ladung je nach dem Sinne der Drehung verstärkt oder geschwächt wird.

Das die Spannung der Flasche anzeigende kleine Elektrometer ist in einer flachen Dose über dem Glasgehäuse des Meßapparates untergebracht, und besteht im wesentlichen aus einem horizontalen, an Fäden hängenden Aluminiumblech, das von einer horizontalen, wie das bewegliche Blech mit der inneren Flaschenbelegung verbundenen Messingscheibe abgestoßen wird, und durch seine Lage die Flaschenspannung anzeigt.

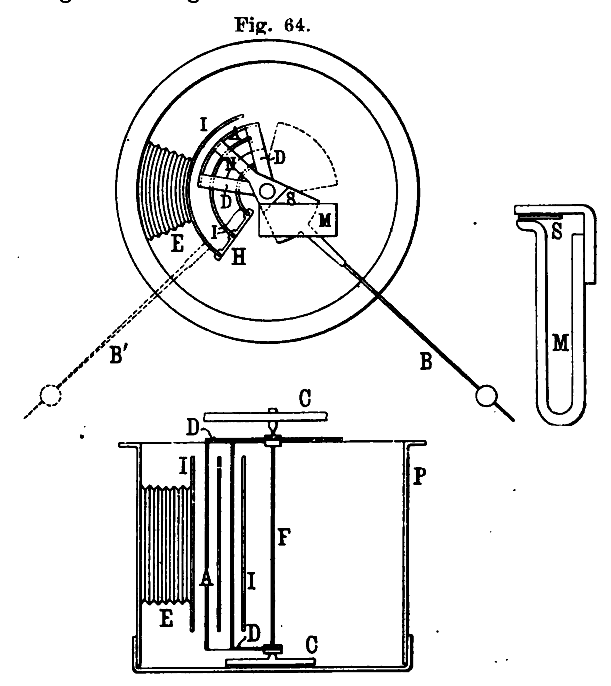
Das Quadrantenelektrometer, welches in den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts entstand, bedarf leider einer subtilen Behandlung und eingehender Beschäftigung mit demselben, um die Resultate zu geben, deren es fähig ist. Es wurde deshalb auch nur von einzelnen Gelehrten benutzt, von Technikern beinahe gar nicht; die neueren Konstruktionen jedoch, welche für die Technik bestimmt sind und sich durch einfachere Behandlung auszeichnen, beruhen im wesentlichen auf demselben.

Für Laboratoriumszwecke haben Nernst und Dolezalek dieses Instrument namentlich dadurch vereinfacht, daß statt der Leydener Flasche eine Zambonische trockene Säule benutzt, in das bewegliche System eingefügt und dasselbe, den beiden Polen der Säule entsprechend, verdoppelt wurde.

Von neueren technischen Konstruktionen erwähnen wir diejenige von Ayrton und Mather, welche in der Art der modernen Schalttafelinstrumente teils für Spannungen um 100 Volt, teils für solche um 2000 Volt gebaut wird, und für die Wechselströme der Technik bestimmt ist.

Bei diesem Instrument, dessen Prinzip in Fig. 64 angedeutet ist, schwingt der bewegliche Teil um eine vertikale Achse zwischen

Fig. 64.

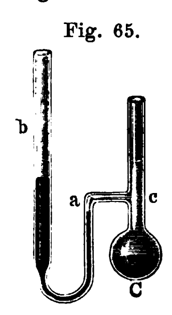


Spitzen und besteht im wesentlichen aus vertikalen zylindrischen Flächen AA, die, durch Stücke N vereinigt, mit dem Zeiger B versehen sind und zwischen den festen Zylinderflächen I sich bewegen; der feste und der bewegliche Teil werden mit der zu messenden Spannung geladen. Durch die zylindrische Anordnung wird verhältnismäßig große Ausdehnung der wirkenden Flächen bei geringem Trägheitsmoment erreicht; auch wird der elektrische Widerstand, der bei Wechselströmen in Betracht kommt, gering. Die Schwingungen des beweglichen Teiles werden elektromagne-

tisch gedämpft, indem ein an demselben sitzendes Blech zwischen den Polen eines Magneten schwingt.

Kapillarelektrometer. Ein eigenartiger, in der Physiologie und Elektrochemie vielfach verwendeter Spannungsmesser ist derjenige von Lippmann, welcher auf der Einwirkung des elektrischen Stromes auf Kapillarerscheinungen beruht und in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts entstand. Fig. 65 zeigt denselben in der Form, welche Ostwald ihm gegeben hat.

Fig. 65.



Ein mit Quecksilber teilweise gefülltes Rohr *b* endigt in ein gebogenes Kapillarrohr, in welchem bei *a* das Quecksilber in Berührung mit verdünnter Schwefelsäure steht; in dem Kölbchen *c* steht diese letztere wieder in Berührung mit der Quecksilbermasse *C*; durch Platindrähte wird der elektrische Strom von *b* nach *C* oder umgekehrt geführt. Der elektrische Strom verändert die große Berührungsfläche bei *C* beinahe gar nicht, die kleine bei *a* im Kapillarrohre dagegen bedeutend, so daß der Oberflächendruck bei *a* ein anderer wird und der Quecksilberfaden im Kapillarrohr steigt oder fällt; zugleich entstehen an beiden Berührungsstellen Polarisationserscheinnungen. Die Größe, um welche die Berührungsstelle *a* steigt oder fällt, ist proportional der zwischen *b* und *C* herrschenden elektrischen Spannung und dient daher zur Messung derselben, z. B. durch ein Mikroskop; das Instrument wird nur zur Messung von geringen Spannungen, von einigen Volt, benutzt.

Der Ausschlag erfolgt rasch und ohne bemerkbare Schwingungen; ein Übelstand liegt darin, daß zur Entfernung der Polarisationen das Instrument nach jeder Spannungsmessung kurz geschlossen werden muß, wodurch Zeitverluste entstehen.

Einen Vorzug vor einem gut gedämpften elektromagnetischen Spannungsmesser, z. B. der Westonschen Art, besitzt dieses Instrument höchstens in dem geringeren Preise und dem Umstande, daß jeder Glasbläser dasselbe anfertigen kann; in bezug auf Genauigkeit und Zuverlässigkeit sind die elektromagnetischen Apparate vorzuziehen.

Widerstandsapparate.

In seiner Arbeit über das später nach ihm genannte Gesetz hatte Ohm bereits das Leitungsvermögen für den elektrischen Strom und den aus demselben abgeleiteten Begriff des Widerstandes eingeführt; die Bezeichnung „Widerstand“ jedoch tritt erst später auf. Die Aufgabe, das Leitungsvermögen zunächst der Metalle, später der Flüssigkeiten zu bestimmen, wurde schon in der ersten Zeit nach der Entdeckung des neuen Gebietes behandelt und ungefähre Angaben über den Wert desselben unter Zugrundelegung einer willkürlichen Einheit, z. B. eines bestimmten Metalldrahtes, gewonnen. Im Verein mit der fortschreitenden Erforschung des elektrischen Stromes entwickelten sich alsdann allmählich die Methoden der Widerstandsbestimmung, die Wahl der bez. Maßeinheit und die zum wissenschaftlichen, später auch technischen Gebrauch dienenden Widerstandsskalen.

Da wir die Entwickelung der Methoden der Widerstandsbestimmung später behandeln, verfolgen wir hier diejenige der Wahl der Maßeinheit und der Konstruktion von Widerstandsskalen.

Maßeinheiten. In der Wahl der Maßeinheit gingen zwei Bestrebungen nebeneinander, die Wahl einer empirischen Maßeinheit, welche sich auf bestimmte, besonders sich eignende Körper und willkürlich gewählte Dimensionen bezog, und diejenige einer absoluten Maßeinheit, welche unabhängig war von den Eigenschaften bestimmter Körper und nur auf den Grundmaßen: Länge, Masse, Zeit, begründet war.

Das Bedürfnis einer empirischen Maßeinheit zeigte sich bald, nachdem man angefangen hatte, die Leitungsvermögen zu bestimmen, weil ohne eine solche ein Physiker nicht die Angaben eines anderen nachprüfen konnte. Da sich Kupfer und Silber als die bestleitenden Metalle gezeigt hatten, wurden verschiedentlich Kupfer- und Silberdrähte von bestimmter Art der Herstellung und bestimmten Dimensionen als Maßeinheiten vorgeschlagen; allein man erkannte bald, daß dieselben weder genau, noch kon-

stant genug waren; namentlich eine wirklich gleichartige Herstellung stieß auf mechanische und chemische Schwierigkeiten.

Jacobi[1]) in Petersburg glaubte 1846 für die Widerstandsbestimmungen eine sichere Grundlage zu schaffen, indem er einen Kupferdraht von 22,4932 Gewicht, 7,61975 m Länge und 0,677 mm Durchmesser, also in ganz willkürlicher Weise, als Einheit wählte und Kopien desselben an einzelne Physiker versandte. Aber auch diese Einheit erwies sich als unsicher, d. h. die einzelnen Etalons stellten sich als ungleich heraus, sobald die Widerstandsbestimmungen genauer wurden.

Eine gewisse Ordnung kam in diese Bestimmungen erst durch W. Weber[2]), der bei der Ausbildung des Gauss-Weberschen absoluten Maßsystems auch absolute Widerstandseinheiten, und zwar sowohl auf elektromagnetischem, als auf dynamoelektrischem Wege definierte und die in seinen Arbeiten vorkommenden Widerstände in dem ersteren Maß und auch die Jacobische Einheit sorgfältig und nach verschiedenen Methoden bestimmte.

Auf die große Mehrzahl der Physiker blieben indessen die Arbeiten Webers vorläufig ohne Einfluß; seine feinen, aber umständlichen und schwierigen Methoden forderten nicht zur Nachahmung heraus. Das Bedürfnis und der Wert eines absoluten Maßsystems trat damals noch wenig hervor, während das Bedürfnis nach irgend einer einheitlichen Ordnung der Widerstandsbestimmungen sich immer mehr geltend machte.

Als W. Siemens[3]) die magnetelektrische Telegraphie in Deutschland einführte und entwickelte, empfand er dieses Bedürfnis auch für die Zwecke der Telegraphie und löste die Frage in einer Weise, die sowohl die Männer der Wissenschaft als die Techniker befriedigte und sich in allgemeiner Übung erhielt bis zu dem Zeitpunkt 1881, als die allgemeine Einführung der absoluten elektromagnetischen Widerstandseinheit erfolgte.

Siemens wählte als (empirische) Widerstandseinheit den Widerstand eines Quecksilberfadens von 1 m Länge, 1 qmm Querschnitt bei 0° C. In dem Laboratorium seiner Fabrik wurden mit wissenschaftlicher Genauigkeit und im Verein mit verbesserten Methoden und Instrumenten eine Reihe von Normaletalons in

[1]) W. Weber, Elektrodynam. Maßbestimmungen, 2. Abt., S. 199.
[2]) Derselbe, dieselbe Abhandlung 1852.
[3]) Pogg. Ann. 110, 1 (1860).

diesem Maß gemessen und mittels derselben in Neusilberdraht Widerstandseinheiten hergestellt, welche in der wissenschaftlichen Welt bald allgemeinen Eingang fanden und die Grundlage bildeten zu den von Siemens und Halske ausgegebenen und bald in allgemeinen Gebrauch gelangenden Widerstandskasten.

Die Siemenssche Widerstandseinheit (S. E.), ausgeführt durch Dehms[1]), zeichnete sich vor den vorher vorgeschlagenen empirischen Widerstandseinheiten dadurch aus, daß sich das Material viel leichter in chemischer Reinheit darstellen ließ als alle anderen Metalle, und sich mit der Zeit nicht veränderte, daß also diese Einheit sich jederzeit von neuem wieder reproduzieren ließ. Für die praktischen Widerstandsmessungen mußten der leichteren Handhabung wegen Etalons aus Metalldraht hergestellt werden; diese konnten sich mit der Zeit etwas verändern, auch bei der fabrikmäßigen Herstellung der Widerstandskasten schlichen sich allmählich aus den verschiedensten Gründen Fehler ein; aber sämtliche Ungenauigkeiten ließen sich jederzeit nachweisen und entfernen durch Vergleichung mit den aus Quecksilber bestehenden Grundmaßen.

Während auf diese Weise das praktische Bedürfnis befriedigt war, fanden, wie bereits früher erwähnt wurde, die Gauss-Weberschen Arbeiten über absolute elektrische Maßeinheiten eine Weiterentwickelung in England durch die British Association for the advancement of science, welche eine Kommission für dieses Gebiet ernannte. In den Arbeiten dieser letzteren wurden die Methoden von Gauss und Weber durch andere ersetzt, welche sich der Beobachtungsart, den Methoden und Instrumenten der Neuzeit anschlossen, und als Grundmaße das Centimeter, das Gramm und die Sekunde einführten, statt der von Gauss-Weber vorgeschlagenen Millimeter, Milligramm, Sekunde.

Nachdem die Arbeiten dieser Kommission im wesentlichen beendet und als praktische Widerstandseinheit des absoluten, elektromagnetischen Maßsystems in England, von anderer Seite, die Ohmad (später Ohm genannt) eingeführt war, welche von der Siemensschen Einheit sich nur um einige Prozente unterschied, trat die Einführung dieses Maßsystems immer mehr hervor, und das diesbezügliche wissenschaftliche Interesse in England und

---

[1]) Pogg. Ann. **136**, 260 (1869).

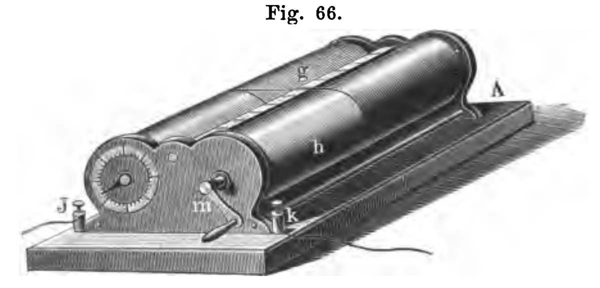
Deutschland konzentrierte sich immer mehr auf das Verhältnis zwischen der Ohmad und der Siemensschen Einheit. Nachdem 1881 der elektrische Kongreß zu Paris das absolute elektromagnetische Maßsystem in der Form der British Association angenommen und die praktische absolute Widerstandseinheit Ohm genannt hatte, kam diese zur allgemeinen Einführung. Die Definition des Ohm, welche der praktischen Herstellung zugrunde gelegt wurde, unterschied sich jedoch von derjenigen der Siemensschen Einheit nur durch eine andere Länge des Quecksilberfadens; dieselbe wurde auf Grund einer Reihe der sorgfältigsten Arbeiten in international bindender Weise festgesetzt.

In Deutschland können heutzutage alle Widerstandsskalen durch die physikalisch-technische Reichsanstalt, deren Gründung im wesentlichen W. Siemens zu verdanken ist, auf das genaueste verifiziert werden.

Bei dem Übergange der Widerstandseinheit in offizielle Hände, welche solchen Arbeiten viel mehr Zeit widmen konnten, als es Technikern möglich ist, zeigte sich, daß die Siemenssche Widerstandseinheit von der Firma Siemens und Halske mit der größtmöglichen Genauigkeit ausgeführt war; der Unterschied beider Bestimmungen war geringer als die Größe der unvermeidlichen Beobachtungsfehler.

Widerstandsskalen. Überblicken wir nun den Entwickelungsgang der Widerstandsskalen. In dem Anfangsstadium der elektrischen Messungen wurden zwar bestimmte Widerstände gebraucht, aber wohl nur in der Form von übersponnenem Draht,

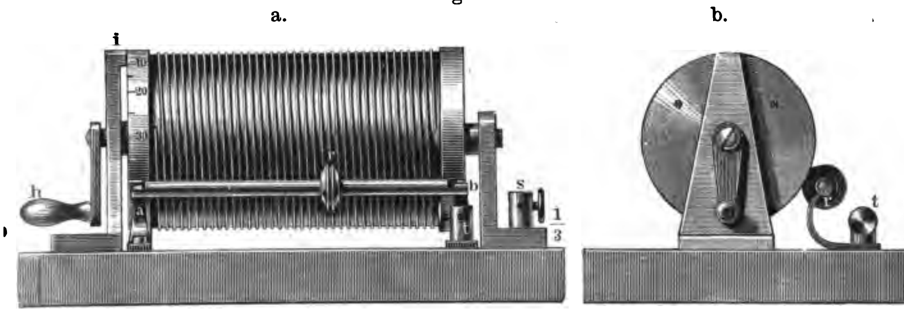
Fig. 66.



der auf Rollen gewickelt war; W. Weber z. B. erwähnt in seinen hierauf bezüglichen Abhandlungen bis etwa 1857 nirgends eine andere Form eines bestimmten Widerstandes.

Später fing man an, regulierbare Widerstandsvorrichtungen, Rheostaten genannt, herzustellen, namentlich in Form von mit blankem Draht bewickelten Zylindern. So legte Wheatstone[1]) (s. Fig. 66) zwei drehbare Zylinder nebeneinander, den einen (g) von Holz mit eingeschnittener Spirale, in welche sich der Draht einlegen konnte, den anderen (h) von blankem Messing ohne Einschnitt. Durch Kurbeln ließ sich entweder der Draht (Kupfer- oder Neusilber-) vom Messingzylinder ab auf den Holzzylinder wickeln oder umgekehrt; das eine Drahtende war mit der Achse des Holzzylinders, das andere mit derjenigen des Messingzylinders verbunden, Schleiffedern besorgten den Kontakt zwischen diesen

Fig. 67.



Achsen und den Klemmen des Apparates; der zwischen diesen letzteren liegende Widerstand bestand in dem auf den Holzzylinder aufgewickelten Draht. Hierbei war es jedoch schwierig, den Draht in straffer Spannung zu erhalten.

Eine Verbesserung bildet der Rheostat[2]) von Jacobi, der mit dem zweiten von Wheatstone übereinstimmt (s. Fig. 67), bei welchem der Draht fest auf eine mit spiralförmigem Einschnitt versehene Porzellanrolle aufgewickelt war; daneben erstreckte sich ein federnder Messingstab ab, auf welchem sich eine Kontaktrolle r verschieben konnte; drehte man die Kurbel h, so drehte sich die an den Draht angedrückte Rolle und ließen sich hierdurch verschiedene Längen des Drahtes einschalten.

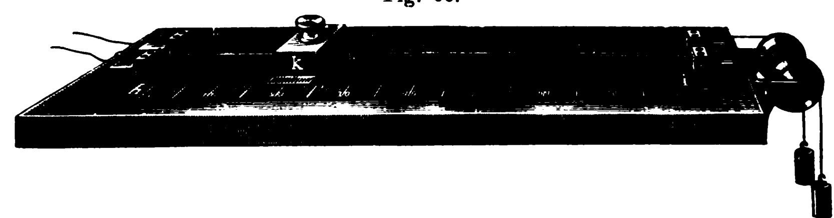
---

[1]) Wheatstone, Phil. Trans. 2, 309 (1843).
[2]) Pogg. Ann. 54, 340 (1841) und 59, 145 (1843).

Später, als das Bedürfnis nach größeren Widerständen auftrat, wendete man statt des Drahtes aufgebrannte Platinfolie, ebenfalls in Windungen, an, gegen welche eine flache Rolle sich andrückte.

Schärfer einstellen ließ sich das Rheochord von Poggendorff[1]) und Neumann (s. Fig. 68), bei welchem längs zweier ausgespannter Drähte ein eisernes Kästchen *k*, mit Seitenflächen von

Fig. 68.



Glas oder Elfenbein und mit Quecksilber gefüllt, verstellt werden konnte. Die Drähte liefen durch feine, in dem letzteren angebrachte Löcher, ohne daß Quecksilber austreten konnte.

Fig. 69.

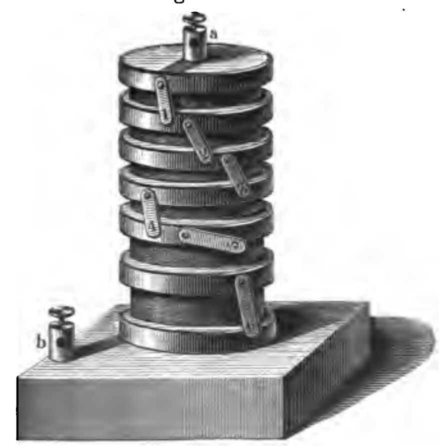


Fig. 70.



In dieser Zeit fertigten sich die Physiker auch vielfach selbst zu bestimmten Zwecken Kombinationen von konstanten Wider-

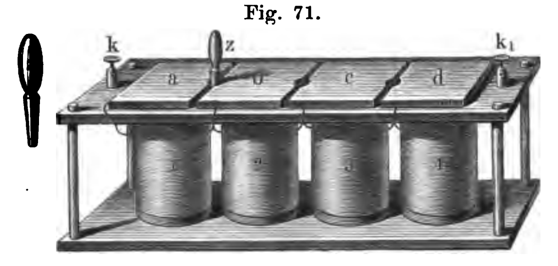
[1]) Pogg. Ann. 52, 511 (1841).

standsrollen an, welche nicht reguliert, aber verschieden geschaltet werden konnten. Hierzu wurden meist, um Kontaktfehler zu vermeiden, Quecksilbernäpfchen verwendet und in denselben starke Kupferdrähte mit amalgamierten Enden, sowohl für die Verbindungen mit den Drahtrollen, als zu den Schaltungen.

Man fing aber auch an, das Quecksilber zu vermeiden und Metallkontakte anzuwenden, so in der Eisenlohrschen Widerstandssäule (Fig. 69) mit drehbaren, fest aufliegenden Kontaktblechen, in der sternförmigen, mit Kurbel versehenen Vorrichtung (s. Fig. 70) und in der Anordnung (Fig. 71), in welcher Metallstöpsel z zwischen feste Messingstücke a, b, c, d eingesteckt und dadurch die unter dem Brette angebrachten Widerstandsrollen kurz geschlossen oder in den Stromkreis eingeschaltet werden konnten.

Die letztere Einrichtung hat sich nun allgemein als die zweckmäßigste und genaueste erwiesen, wenn Stöpsel und Stöpsel-

Fig. 71.



löcher mit Genauigkeit angefertigt werden. Für die Anordnung der Widerstandsrollen ferner hat sich das in den Gewichtssätzen überall angewendete dekadische System eingebürgert, nach welchem für jede Dekade, z. B. von 1 bis 10, Werte z. B. von 1, 2, 2, 5 des betreffenden Maßes verwendet werden, deren Summe 10 beträgt und als Einheit für die nächst höhere Dekade dient.

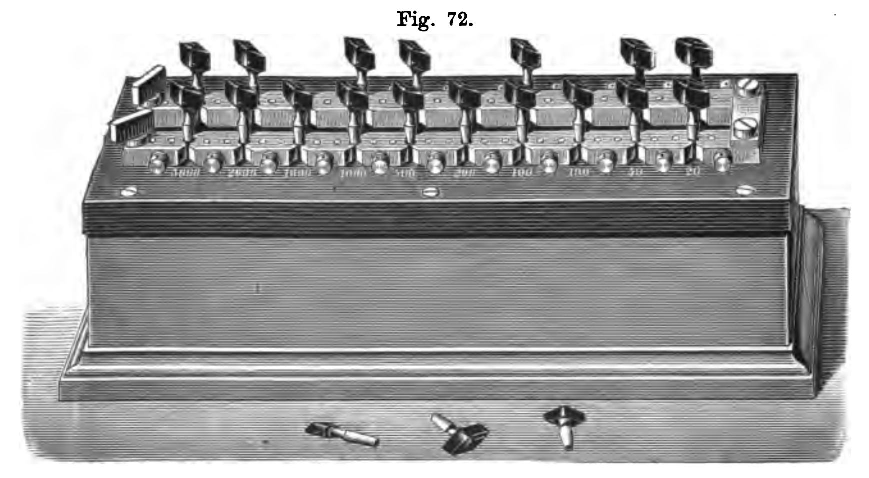
Solche Widerstandsskalen, deren Grundlage die Siemenssche Einheit bildete, wurden zuerst von Siemens und Halske in den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts angefertigt und ausgegeben und werden heutzutage mit geringen Abweichungen von den Fabrikanten aller Länder hergestellt.

Nach der Einführung der Widerstandseinheit Ohm 1881 wurde in diesen Skalen allmählich die Siemenssche Einheit durch das Ohm ersetzt.

Fig. 72 stellt eine solche Skala von obiger Firma dar. Auf einer starken Horngummiplatte sind zwei Reihen dicker Messingklötze angeschraubt, zwischen denen genau gearbeitete Stöpsellöcher sich befinden zur Aufnahme der Stöpsel, die aus einem konischen Metallstücke und einem Horngummigriffe bestehen. Von jedem Messingklotz führt ein Kupferdraht ins Innere des Kastens und trägt unten zwei Klemmchen, an welchen die Enden der benachbarten Rollen geführt sind und wo die Justierung vorgenommen wird.

Als Metall für die Widerstandsrollen diente früher Neusilber, heutzutage meist Manganin, eine Legierung von Kupfer, Mangan,

Fig. 72.



Nickel, der geringen Veränderung des Widerstandes mit der Temperatur wegen; die Rollen sind, um die Selbstinduktion möglichst zu verhindern, bifilar gewickelt, d. h. derart, daß in einer Hälfte der Windungen der Strom räumlich umgekehrt gerichtet ist wie in der anderen Hälfte.

In neuester Zeit wendet man auch vielfach Sternwiderstände an (s. Fig. 73). Bei diesen besteht jede Dekade aus zehn einzelnen Rollen, von denen durch eine auf Knöpfen gleitende Kurbel die gewünschte Anzahl eingeschaltet werden kann; jede Kurbel besteht aus mehreren kräftigen kupfernen Blattfedern, welche durch eine starke Spiralfeder an die Gleitknöpfe angedrückt werden, um guten Kontakt zu geben.

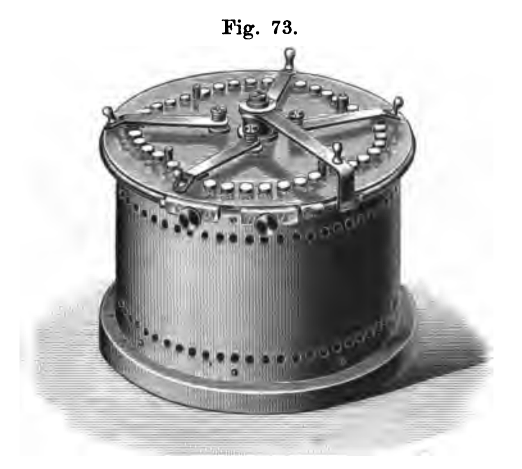
Die Stöpselwiderstände sind kompendiöser als die Stromwiderstände; die Handhabung jedoch ist bei den letzteren leichter.

Kombinationen von Widerstandsskalen zu bestimmten Zwecken besprechen wir bei den Meßmethoden.

Die Widerstandseinheiten, früher die Siemenssche Einheit, jetzt das Ohm, werden mit besonderer Sorgfalt hergestellt, so daß sie zu den genauesten Messungen verwendet werden können.

Als noch die Siemenssche Einheit (S. E.) die Grundlage der Widerstandsmessungen bildete, besaß die Firma Siemens und Halske eine Anzahl von Glasröhren von ungefähr 1 m Länge

Fig. 73.



und ungefähr 1 qmm Querschnitt der Öffnung, bei welchen der Querschnitt an vielen Stellen, ähnlich wie bei der genauen Kalibrierung eines Quecksilberthermometers, ausgemessen und daraus, in Verbindung mit der genau bestimmten Länge, der Widerstand der Quecksibersäule in Siemens-Einheiten, bei 0^0, berechnet wurde. Mit diesen Grundmaßen wurden die Widerstände einer Anzahl Quecksilbernormalen (s. Fig. 74) verglichen, welche aus einer spiralförmigen Glasröhre mit weiten Ansätzen zur Einführung der Kontaktstücke in das Quecksilber bestanden, und deren Gebrauch handlicher war, und diese wiederum mit sogenannten Doseneinheiten (s. Fig. 75), bei denen ein Neusilberdraht den Widerstand bildete, und welche so hergestellt wurden, daß der

Widerstand bei einer genau bestimmten, zwischen 10⁰ und 20⁰ liegenden Temperatur gleich 1 S. E. war. Diese Doseneinheiten wurden alsdann als Normalwiderstände ausgegeben, so daß jeder Interessent in der Lage war, die Widerstandsskalen mit den letzteren zu vergleichen.

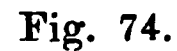


Fig. 74.

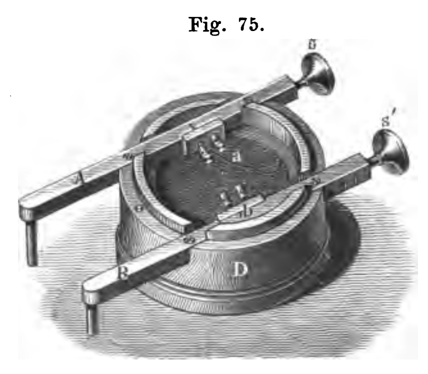


Heutzutage ist die Bestimmung und Kopierung der Normalwiderstände in jedem der wichtigsten Länder in den Händen eines offiziellen Institutes, welches auf Wunsch jede eingesandte Widerstandsskala genau mit den Normalien vergleicht, während die Fabrikanten nach Normalien arbeiten, welche mit den offiziellen Normalien verglichen sind.

Das System der Normalwiderstände in jenen offiziellen Instituten ist, abgesehen von Verbesserungen, dasselbe wie das früher von Siemens u. Halske gehandhabte.

Das sicher konstante Element in diesen Maßbestimmungen bildet das reine Quecksilber; die Dimensionen der Glasröhren, namentlich aber der Widerstand von Drähten, können im Laufe der Zeit Veränderungen erleiden und müssen daher von Zeit zu Zeit neu bestimmt werden.

Fig. 75.



Technische Widerstände. Der mit starken Strömen arbeitende Elektrotechniker muß für seine Versuche und für viele technische Apparate Widerstände haben, deren Genauigkeit nur gering zu sein braucht, welche aber durch die betreffenden Ströme nur mäßig

erwärmt werden dürfen. Es werden zu solchen Zwecken die verschiedensten Mittel und Anordnungen verwendet, z. B. dicke Drähte, Metallgaze, gekühlte Metallrohre, Glühlampen, galvanische Zersetzungszellen usw. Die kompendiösesten sind die letzteren, allerdings auch die wenigst genauen; z. B. eine Batterie von Wasserzersetzungszellen, welche Elektroden aus Eisenblech besitzt und einen Raum von etwa 6 cbm einnimmt, kann eine elektrische Energie von etwa 1000 Pferdekräften aufnehmen.

Kondensatoren.

Der Gebrauch von Kondensatoren, d. h. von Apparaten, welche eine elektrische Ladung aufnehmen können, ist ebenso alt wie die Elektrisiermaschine; denn jeder in Verbindung mit der letzteren benutzte „Konduktor" ist ein Kondensator (gegen Erde), namentlich aber die Leydener Flasche und die Franklinsche Tafel. Das Urbild dieser Apparate sind zwei einander gegenüberstehende, mit Elektrizität verschiedener Spannung geladene Metallflächen, deren Zwischenraum durch einen Nichtleiter, das jetzt so genannte Dielektrikum, ausgefüllt wird.

Indessen wurde die Kondensation erst eigentlich messend verfolgt und wurden Maße der Kondensation theoretisch eingeführt und praktisch ausgeführt in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts, als etwa gleichzeitig die elektrischen Ladungen der langen Kabel gemessen werden mußten und die British Association in das Gauss-Webersche absolute Maßsystem ein praktisches Grundmaß der Kondensation, die Mikrofarad, einfügte. Beide Tatsachen stehen wohl im Zusammenhang, da bei beiden Sir W. Thomson der Hauptbeteiligte war.

Bei der Ausführung solcher Kondensatoren war man bald genötigt, als Dielektrikum unter den in Betracht kommenden Materialien dasjenige zu wählen, welches gestattet, eine verhältnismäßig große Kapazität und zugleich gute Widerstandsfähigkeit gegen das Durchschlagen zu erreichen, nämlich Glimmer; die

meisten für niedrige Spannung, etwa bis 100 Volt, bestimmten Kondensatoren werden aus vielen möglichst dünnen paraffinierten und mit Stanniol belegten Glimmerblättern zusammengesetzt, wobei die Belegungen alternierend mit den beiden Klemmen des Kondensators verbunden werden. Der Glimmerkondensator zeichnet sich außerdem dadurch aus, daß er bei der Entladung beinahe keinen Rückstand zeigt, während dieser namentlich bei Harzmassen beträchtlich ist. In der Technik wird bei niederer Spannung statt Glimmer vielfach feines, mit Paraffinen, Harzen oder Ölen getränktes Papier verwendet, namentlich wegen der geringeren Kosten.

Die größten Niederspannungskondensatoren sind die, welche man in der Telegraphie auf langen Kabeln zum Telegraphieren nach einer Richtung und zum gleichzeitigen Telegraphieren in beiden Richtungen benutzt.

Für höhere Spannungen werden in der modernen Technik in zwei verschiedenen Gebieten Kondensatoren angewendet, nämlich in der Wechselstromtechnik und der drahtlosen Telegraphie; in der ersteren gilt es namentlich, die Wirkungen der Selbstinduktion zu schwächen, bei der letzteren bilden die Kondensatoren wie bei den Versuchen mit der Elektrisiermaschine gleichsam Sammelbehälter zur Aufspeicherung der Elektrizität. In der Wechselstromtechnik scheinen bewährte Typen der Kondensatoren noch nicht allgemeinere Verbreitung gefunden zu haben. In der drahtlosen Telegraphie braucht man nur sehr kleine Kapazitäten und benutzt namentlich Luftkondensatoren.

Selbstinduktionsskalen.

Erst in der neuesten Zeit hat man es zu wissenschaftlichen und technischen Messungen für nötig befunden, Skalen der Selbstinduktion herzustellen; der Gebrauch derselben steht im Zusammenhange mit den genaueren Wechselstrommessungen.

Der Natur der Sache nach besitzt ein Maß der Selbstinduktion nicht nur diese, sondern auch Widerstand; denn die Selbstinduktion entwickelt sich erst bei dem Durchgange des Stromes durch Drahtwindungen, welche auch einen gewissen Widerstand haben. Allein die Schwierigkeit der Herstellung solcher Maße besteht in der Fernhaltung der Kapazität, d. h. der elektrischen Ladung, welche sich auf der Oberfläche eines Drahtes bildet und durch andere geladene Oberflächen hervorgerufen wird.

Apparate zur Messung magnetischer Eigenschaften.

Die Gebiete des Magnetismus und des elektrischen Stromes stehen bekanntlich in innigem Zusammenhange, und zwar sowohl die Erscheinungen als die Theorie; dieser Zusammenhang äußert sich auch in der wissenschaftlichen Entwickelung beider Gebiete, indem eine stete Wechselwirkung stattfindet, bald magnetische Erscheinungen zu Hilfe genommen werden, um elektrische zu erklären, bald umgekehrt. Infolgedessen sehen wir denn auch, wenn wir die Entwickelung der Instrumente überblicken, bald magnetische Apparate im Dienste elektrischer Messungen, bald elektrische Apparate verwendet zum Studium magnetischer Eigenschaften.

Wir können hier nur einen kurzen Blick werfen auf die Entwickelung der letzteren Apparate, da die Erkenntnis der magnetischen Eigenschaften nicht unmittelbar in den Rahmen unserer Schrift gehört; indessen bietet eine gedrängte Übersicht dieser Entwickelung auch vom Standpunkte der elektrischen Messungen aus Interesse.

Bevor die magnetischen Eigenschaften des elektrischen Stromes bekannt wurden, waren die Eigenschaften der permanenten Magnete und des Erdmagnetismus eingehend studiert worden und hatten die Entstehung einer Theorie des Magnetismus veranlaßt, welche noch heutzutage, allerdings nur in formaler

Hinsicht, zugrunde gelegt wird. Dieses Werk fand im wesentlichen seinen Abschluß durch die großen Arbeiten von Gauss, seine Potentialtheorie, seine Zurückführung der magnetischen Erscheinungen auf absolute Maße und seine Meßmethoden, die sich nur permanenter Magnete bedienten.

Ungefähr gleichzeitig mit dem Abschluß der Gaussschen Arbeit wurde die Ablenkung der Magnetnadel durch den Strom und bald darauf der Elektromagnet entdeckt; diese beiden Tatsachen bildeten die Ausgangspunkte für die Entwickelung der magnetelektrischen Instrumente und der technischen Arbeiten, welche schließlich zur Konstruktion der Maschinen zur Erzeugung von elektrischem Strome mit Hilfe des elektrischen Stromes führte.

Ein Bild davon, wie sich von dieser Zeit an durch beinahe ein Jahrhundert hindurch die elektrischen Meßapparate, die sich permanenter Magnetstäbe bedienten, entwickelten, haben wir bei der Besprechung der Strommesser gegeben. Wir haben aber auch gesehen, daß namentlich der Mangel an genügender Konstanz, neben anderen Rücksichten, einerseits auf die Anwendung von beinahe geschlossenen Magnetsystemen zur Erzeugung kräftiger und konstanter magnetischer Felder führte, andererseits zur Anwendung auch des Eisens in den einfachen Meßinstrumenten, weil Eisen sich auch durch Wechselstrom magnetisiert und seine magnetischen Eigenschaften sich nicht ändern.

Umgekehrt war der Elektrotechniker durch die großartige Entwickelung der magnetelektrischen Maschinen immer mehr genötigt, sich mit den magnetischen Eigenschaften des Eisens zu beschäftigen, weil von denselben wesentlich die Leistungsfähigkeit der von ihm konstruierten Maschinen abhängt; aber auch wissenschaftliche Forscher, von den Fortschritten der Elektrotechnik angeregt, beschäftigten sich mit denselben.

Diese Untersuchungen zeigten nun, wie kompliziert und wechselvoll der Magnetismus des Eisens sich verhält, daß derselbe zwar im allgemeinen jeder Änderung der erregenden Stromstärke folgt, aber in verschiedener Weise und unter verschiedenen Umständen, und sogar von der magnetischen Vorgeschichte, d. h. von der Art der vorhergehenden magnetischen Vorgänge, abhängt.

Remanenz; Hysteresis. Die Remanenz des Eisenmagnetismus war längst bekannt; der Elektrotechniker benutzt ja auch dieselbe in hervorragender Weise, indem er nur Eisen-

kerne, keine permanenten Magnete, in seinen Maschinen verwendet und die Remanenz des Eisenmagnetismus den Ausgangspunkt der Wechselwirkung von Magnetismus und elektrischem Strome, des „Angehens“ der Dynamomaschine, bildet und die Entstehung des Magnetismus und Stromes der Dynamomaschine erst möglich macht.

Der Techniker hatte sich indessen um die Remanenz kaum zu kümmern; denn eine gewisse Remanenz ist nach Aufhören des Stromes stets sicher vorhanden, und wie groß dieselbe ist, hat beinahe keinen Einfluß auf den Grad des Magnetismus in der erregten Gleichstrommaschine. Auch bei den Eisenkörpern in gröberen Meßinstrumenten war die Remanenz von geringer Bedeutung, weil der Meßbereich sich meist auf kräftig erregten Eisenmagnetismus bezog.

Von größerer technischer Bedeutung sind die Erscheinungen der Hysteresis des Eisenmagnetismus unter dem Einflusse von Wechselströmen. Bei jeder ganzen Welle des Wechselstromes erfolgt ein Auf- und ein Absteigen des Magnetismus; dieselben zeigen nie gleiche Kurven, und der Zwischenraum zwischen beiden Kurven entspricht einer nicht unbedeutenden elektrischen Energie, welche bei jeder ganzen Stromperiode verloren geht und zur Veränderung des Magnetismus verbraucht wird. Der Wechselstromtechniker muß den Betrag dieser Energie kennen und auch die Höhe der magnetischen Maxima, welche bei bestimmter Stromstärke und Wechselzahl pro Minute erreicht werden; er muß also am besten die ganzen Kurven des Magnetismus während des Wechselstromes aufzeichnen können.

Die Schwierigkeiten, welche sich der Konstruktion von Meßinstrumenten auf diesem Gebiete entgegenstellen, sind indessen beinahe ausschließlich magnetischer Natur; es handelt sich darum, den zu prüfenden Eisenkörpern eine einfache, handliche Form zu geben, die magnetischen Widerstände, welche zwischen zwei benachbarten Stücken des magnetischen Kreises sich stets bilden, möglichst herabzudrücken, die Streuung der Kraftlinien, d. h. die Entstehung von Kraftlinien außerhalb der Eisenkörper, möglichst zu vermeiden, rasche und doch sichere Angaben zu erhalten usw.

Die elektrischen Mittel, die bei diesen Instrumenten zur Anwendung kommen, sind verhältnismäßig einfach; meistens werden die Stromstöße benutzt, welche in der Wickelung eines Eisen-

kernes entstehen, wenn sein Magnetismus sich verändert, aber auch z. B. die Ablenkung, welche Stromdrähte erfahren, wenn das magnetische Feld, in dem sie sich befinden, sich verändert.

Die Anzahl der Instrumente, welche zu diesen Zwecken entstanden sind, ist keineswegs gering, und man hat den Eindruck, daß die Konstruktionen den Bedürfnissen der Praxis noch nicht ganz entsprechen und sich noch im Fluß befinden.

Es kann indessen füglich behauptet werden — und dies muß uns an dieser Stelle genügen — daß, sowohl zum wissenschaftlichen Studium der magnetischen Eigenschaften der Körper als zur technischen Untersuchung der Eisensorten, eine Reihe von Instrumenten bereits vorhanden sind, welche teils mit großer Genauigkeit, aber nicht sehr rasch, teils zwar nur mit „technischer“ Genauigkeit, aber rasch, arbeiten; es gibt sogar Apparate, welche die magnetischen Kurven, z. B. der Hysteresis, direkt aufzuzeichnen vermögen.

Elektrische Wärmemesser.

Wie die Wärme benutzt werden kann, um den elektrischen Strom zu messen, haben wir bereits bei den Hitzdrahtstrommessern gesehen; allein derselbe Zweck wird auf magnetelektrischem Wege ebenfalls erreicht. Die umgekehrte Aufgabe aber, die Wärme durch den elektrischen Strom zu messen, wurde bereits in den frühesten Zeiten der Entwickelung der Lehre vom elektrischen Strome mit Erfolg gelöst und bildete eine neue Epoche in der Wärmelehre.

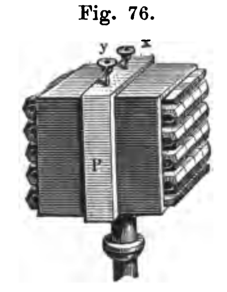
Seebeck; Nobili. Seebeck fand 1823, daß die Lötstellen zweier Drähte von verschiedenen Metallen eine Elektrizitätsquelle bilden, wenn zwei in demselben Stromkreise befindliche Lötstellen verschiedene Temperaturen haben; es ist dies die sogenannte Thermoelektrizität. Man untersuchte alle Metalle und Metalllegierungen auf ihr thermoelektrisches Verhalten und fand z. B., daß unter den in Drähte ausziehbaren Metallen die Kombination

Eisen—Neusilber, unter den übrigen leicht beschaffbaren Metallen Wismut—Antimon, und unter den Legierungen Zinkantimon in Kombination mit Eisen die kräftigsten thermoelektrischen Wirkungen liefert. Da hier eine unmittelbare Umwandlung der Wärme in elektrischen Strom vorliegt, während bei den Dynamomaschinen diese Umwandlung auf dem Umwege über die mechanische Arbeit geschieht, so wurde vielfach versucht, thermoelektrische Batterien zur Stromerzeugung herzustellen; man gelangte jedoch nur so weit, daß diese Batterien im Laboratoriumsgebrauch die galvanischen Batterien ersetzen konnten; in der elektrischen Technik konnten sie sich wegen mangelnder Ökonomie nicht festsetzen.

Zu wissenschaftlichen Messungen der Wärmeausstrahlung jedoch fanden die Thermosäulen eine wichtige Verwendung und sind für diesen Zweck auch heutzutage durch andere Apparate wenig angewendet worden.

Eine zu diesem Zweck noch heute vielfach benutzte Thermosäule, aus Wismut und Antimon, ist diejenige von Nobili (siehe Fig. 76). In derselben sind die Stäbchen abwechselnd aneinander gelötet, die ungeraden Lötstellen bilden eine, die geraden Lötstellen die andere Stirnfläche des Apparates, der in eine Metallhülse isoliert eingesteckt und mit Klemmen versehen ist, welche beziehungsweise mit dem ersten und dem letzten Stäbchen verbunden sind. Wird eine Stirnfläche durch strahlende Wärme beschienen, so entsteht an einem mit der Thermosäule zu einem Kreise verbundenen empfindlichen Galvanometer eine Ablenkung, welche im wesentlichen proportional der Temperaturdifferenz der beiden Stirnflächen und der eingestrahlten Wärmemenge ist; es kann also die letztere durch den thermoelektrischen Strom gemessen werden.

Fig. 76.



Als Galvanometer benutzten Nobili und seine Nachfolger das von ihm konstruierte Galvanometer mit astatischer Nadel; dasselbe war mit verhältnismäßig dickem Kupferdraht bewickelt, um den Widerstand demjenigen der Thermosäule annähernd gleich und die Ablenkung möglichst groß zu machen. Später wurde dieses Galvanometer durch die neueren Spiegelgalvanometer er-

setzt, da durch dieselben erheblich höhere Genauigkeit und Empfindlichkeit der Messung erreicht wurde.

Mit dieser Apparatkombination war es bekanntlich möglich, die Erscheinungen der strahlenden Wärme in ähnlicher Weise zu durchforschen, wie es mit denjenigen des Lichtes bereits im wesentlichen geschehen war, namentlich deren Emission, Absorption, Brechung, Reflexion, Polarisation usw.; namentlich mittels der Thermosäule gelang es, in dem Spektrum, d. h. den auseinander gelegten Strahlen eines erwärmten Körpers, zu zeigen, daß Lichtstrahlen solche Wärmestrahlen sind, welche auf unser Auge wirken.

Neuere Arbeiten. Die Untersuchung der Wärmewirkung im Spektrum gewann in neuerer Zeit, zu verschiedenen Zwecken, immer größere Ausdehnung; und da in demselben jeder Strahl nur durch eine schmale Linie dargestellt ist, mußte man die Nobilische Thermosäule verlassen und Apparate konstruieren, bei denen die wärmeempfindliche Fläche ein schmales Rechteck bildete.

Für diesen Zweck ließen sich allerdings auch Thermosäulen konstruieren, wie z. B. diejenige von Rubens, bei welcher die Lötstellen einer aus Drähten bestehenden Thermosäule, übereinander angeordnet, eine Linie bilden. Allein diese Aufgabe ließ sich natürlicher lösen, indem man zu einem anderen Prinzipe, demjenigen des Bolometers, überging.

Dieses Instrument beruht darauf, daß der elektrische Widerstand eines metallischen Körpers sich mit der Temperatur ändert. Bildet man also denjenigen Apparatteil, der die strahlende Wärme empfangen soll, als einen dünnen Metallstreifen oder Draht aus, so daß derselbe Temperaturwechseln rasch zu folgen vermag, und wendet die feinsten Mittel der Widerstandsmessung an, so kann man die Menge der eingestrahlten Wärme durch Widerstandsmessung verfolgen.

Wir erwähnen diese Methode noch einmal bei Gelegenheit der Methoden der Widerstandsmessung.

Eine andere Anwendung der Thermoelemente fand erst in neuester Zeit allgemeinere Verbreitung, nämlich diejenige zur Messung der Temperatur; denn auch die Messung der Wärmestrahlung durch die Thermosäule ist eigentlich eine Messung des Temperaturunterschiedes der beiden Lötstellenhälften.

Auf dem Gebiete der niederen Temperaturen, welche sich mit genügender Genauigkeit durch Thermometer messen lassen, zeigten die Thermoelemente nur in solchen Fällen eine Überlegenheit über die Thermometer, in denen die Stellen, deren Temperaturen zu messen waren, nicht oder schwer zugänglich waren, oder der Beobachtungsort in einiger Entfernung angelegt werden sollte. Es entstanden so thermoelektrische Messungen in Bohrlöchern, im Innern von Haufen gärender Substanzen, in der Tiefe von Seen, Meeren, Gletschern usw. Allein auch in solchen Fällen wurden die Thermoelemente oft ersetzt durch Drahtrollen, deren Widerstand sich durch die Wärme veränderte und bei welchen man stärkere Ströme anwenden und größere Entfernungen überwinden konnte.

Auf dem Gebiete der höheren Temperaturen, wo die Thermometer versagen, ließ sich lange Zeit hindurch die thermoelektrische Temperaturmessung nicht einführen, weil die elektromotorische Kraft der inbetracht kommenden Metallkombinationen bei höheren Temperaturen entweder mit steigender Temperatur zu wenig zunahm oder gar abnahm und schließlich die Richtung änderte.

Erst in neuester Zeit wurde ein Thermoelement gefunden, welches aus sehr schwer schmelzbaren Metallen besteht und dessen thermoelektromotorische Kraft bis zu Temperaturen von etwa 1600° beinahe gleichmäßig zunimmt. Dies ist das Thermoelement von Le Châtelier, bestehend in einem Draht aus Platin und einem solchen aus Platinrhodium mit geschweißter Lötstelle. Dieses Element, umgeben von Röhrchen und Körpern aus Ton, Porzellan, eventuell Eisen usw., kann in den Wandungen der Öfen, auch in den Schmelzflüssen selbst, angebracht werden und gibt solche Zuverlässigkeit und Genauigkeit, daß dessen Temperaturangaben z. B. von der deutschen physikalisch-technischen Reichsanstalt beglaubigt werden.

Als Strommesser dienen Drehspul- oder Deprez-d'Arsonval-Galvanometer mit direkter Ablesung, welche dann direkt in Temperaturgraden geeicht werden. Da die Angaben bei Messung des Stromes von den Widerständen der Zuleitungen abhängen, mißt man auch dessen thermoelektromotorische Kraft nach der Kompensationsmethode (s. unten), wobei jene Widerstände und derjenige des Instrumentes nicht mehr ins Gewicht fallen.

Seit dem Bekanntwerden dieses trefflichen Elementes beginnt die Hütten- und chemische Industrie immer mehr, sich desselben zu bedienen; so werden z. B. bereits an Hochofenanlagen Registrierapparate angewendet, welche den Temperaturverlauf in den Öfen fortlaufend selbsttätig aufzeichnen.

Die Elektrizitätszähler.

Der Eintritt der elektrischen Maschine in das öffentliche Leben geschah in der Reihenfolge, daß zunächst mit Bogenlampen Straßen, Plätze, Säle, dann aber, nach Erfindung der Glühlampe, auch das Innere der Häuser beleuchtet wurden; der Betrieb von Elektromotoren in Werkstätten usw. trat meist zuletzt auf.

Sobald der elektrische Strom in das Innere der Häuser drang, sah der Lieferant des Stromes sich vor der Notwendigkeit, den Stromverbrauch der einzelnen Abnehmer durch besondere Instrumente zu messen, in ähnlicher Weise, wie es bereits seit langer Zeit bei Gas- und Wasseranlagen geschieht. So entstanden die Elektrizitätszähler.

Für die Konstruktion von Zählern sind im Laufe der Zeit die mannigfachsten Prinzipien benutzt worden; manche Apparate, welche Hoffnungen erweckt hatten, sind mit der Zeit verschwunden, mehrere haben sich in der Gunst der Techniker und des Publikums erhalten, meist in jedem Lande mehrere Konstruktionen.

Wir erwähnen hier nur einige Apparate als Beispiele der verschiedenen Klassen.

Uhrzähler. Der älteste Elektrizitätszähler, welcher noch heute in vielfacher Anwendung steht, ist derjenige von H. Aron[1]); derselbe beruht darauf, daß die Schwingungsdauer eines Pendels

[1]) Aron, E. T. Z. 1886, S. 353 ff. Ayrton und Perry patentierten 1882 dasselbe Prinzip in England, und Shoolbred konstruierte danach Zähler; dieselben scheinen jedoch im Gebrauch sich nicht eingeführt zu haben.

durch den Strom beeinflußt wird und die Differenz der Schwingungszahl des elektrisch beeinflußten und eines gleichen, nicht beeinflußten Pendels ein Maß für den Stromverbrauch bildet.

Ursprünglich wurde eine Pendeluhr verwendet, an deren Pendel unten ein vertikaler Magnet befestigt war, und über dem Ende einer darunter angebrachten, vom Gebrauchsstrome durchflossenen Drahtrolle hin und her schwang; durch die Anziehung zwischen Magnet und Stromrolle wurden die Schwingungen schneller, die Uhr ging also einer normalen, nicht beeinflußten Uhr vor, und das Voreilen der Zähleruhr gab das Maß des Stromverbrauches.

Fig. 77.



Im Anfang wurden die Angaben dieser Zähler mit denjenigen einer Normaluhr verglichen. Hierbei war vorausgesetzt, daß die Zähleruhr ohne Strom keine Gangfehler zeigte und daß der Magnetismus des Magnets sich nicht veränderte.

Um die Gangfehler möglichst zu eliminieren, wurden dann zwei möglichst gleiche Pendel nebeneinander aufgehängt, das eine vom Strom beeinflußt, das andere nicht; beide wirkten auf ein zwischen denselben angebrachtes Zählwerk so, daß dieses die Differenz der Schwingungen angab, also den Stromverbrauch in Amperestunden. Diese Modifikation wurde Differentialzähler genannt, Fig. 77 zeigt dieselbe.

Der Entwickelung der Elektrotechnik folgend, konstruierte Aron 1892 [1]) einen Drehstromzähler.

Da im Dreh- oder Dreiphasenstrome (Stern- oder Dreieckschaltung) drei Stromstärken und drei Spannungen vorkommen, erhält der allgemeine Ausdruck für die elektrische Energie eine komplizierte Form, so daß man hiernach sechs Rollenpaare hätte aufeinander wirken lassen müssen. Aron konnte diesen Aus-

[1]) E. T. Z. 1892, S. 193.

druck durch Einführung der Kirchhoffschen Gleichungen auf zwei Produkte reduzieren, so daß nur zwei Rollenpaare nötig wurden; er befestigte demnach am Pendel, zu beiden Seiten, je eine Voltrolle und ließ jede derselben in einer festen Ampererolle schwingen. (Hierbei brauchten selbstverständlich bei den Ampererollen nicht die betreffenden Ströme selbst, sondern nur kleine bestimmte Teile derselben die betreffenden Rollen zu durchfließen.)

Später verbesserte Aron seinen Zähler in mehrfacher Beziehung.

Das Aufziehen der Uhr, das vorher von Hand erfolgte, wurde durch ein elektrisches Werkchen besorgt, das beim Ablauf der Feder sich selbsttätig einschaltete; dasselbe bestand im wesentlichen aus einem zwischen den Polen eines Elektromagneten schwingenden Eisenstabe, dessen Schwingungen durch Schließung und Öffnung des Stromes, ähnlich wie bei dem Selbstunterbrecher eines Induktionsapparates, verursacht wurden, und welcher mittels eines Räderwerkes die Feder aufzog.

Das Anstoßen des Pendels, das vorher, bei dem Aufstellen des Zählers, ebenfalls von Hand erfolgen mußte, wurde später durch Anwendung kleiner Pendel (etwa 10 cm Länge) bewirkt, welche beim Transport gar nicht arretiert zu werden brauchten und von selbst angingen, wenn Strom in den Apparat kam.

Um endlich verhältnismäßig große Bereiche der Ströme anwenden zu können, mußte eine von dem Quadrate der Stromstärke abhängige Nebenwirkung beseitigt werden. Hierzu und zu der Elimination der Gangfehler wurden sowohl die Stromrichtung als die Drehungsrichtung des Zählwerkes, teils beide zugleich, teils die erstere allein, von Zeit zu Zeit selbsttätig umgeschaltet.

Für den Betrieb von Akkumulatoren modifizierte Aron den Zähler dahin, daß zwei Zählwerke in Anwendung kamen, das eine für Ladung, das andere für Entladung, so daß diese beiden Momente getrennt selbsttätig gemessen wurden.

Später veränderte Aron den Zähler derart, daß Dreiphasenstrom mit neutralem Leiter gemessen werden konnte.

Zu diesem Zwecke erweiterte er die Formel, welche der Verfasser[1]) für die Arbeit des Dreiphasenstromes, ohne neu-

---

[1]) E. T. Z. 1898, S. 574.

tralen Leiter, gegeben hatte und welche aus drei Produkten bestand, für diesen Fall, und wendete für ein Zählwerk zwei Pendel mit Voltrollen an, von denen jedes zwischen zwei festen Ampererollen hin und her schwang, also von beiden beeinflußt wurde.

Wie aus dem vorigen erhellt, lehnt sich der Aronzähler an das gewöhnliche Uhrwerk an, der Einfluß des elektrischen Stromes zeigt sich nur in einer Differenz des Ganges; dafür besorgt aber das Uhrwerk die Beseitigung der Ermüdungsfehler, welche infolge der mechanischen Reibungen in Achsen und Rädereingriffen auftreten, indem es dem Pendel bei jeder Schwingung einen Stoß gibt. Andererseits rührten die Mißlichkeiten, welche der Ausbildung dieses Zählers entgegentraten, meist von der Verbindung mit dem Uhrwerk her.

Motorzähler. Es war ganz natürlich, daß den Erfindern mehrfach der Wunsch sich aufdrang, den Zähler durch den Strom selbst treiben zu lassen und eine mechanische Triebkraft gar nicht anzuwenden. Dieses Prinzip erscheint allerdings auf den ersten Blick reiner und zweckentsprechender; aber für die Ausführung treten Schwierigkeiten in demselben Maße auf, wie bei dem Aronschen Zähler; nur sind dieselben anderer Natur und rühren teils von den mechanischen Reibungen her, deren schädliche Einwirkung bei dem Aronzähler schon durch das Prinzip beseitigt wird, teils sind sie elektrischer Art.

Zähler dieser Konstruktion heißen Motorzähler, weil sie einen kleinen Elektromotor enthalten, der durch den zu messenden Strom in Gang kommt; die Aufgabe des Konstrukteurs besteht dann namentlich darin, die Geschwindigkeit des Motors so zu beeinflussen, daß dieselbe genau proportional der zu messenden elektrischen Größe, Strom oder Energie, wird und sich deshalb zum Zählen eignet.

Wenn der Motor frei läuft, so hat er keine andere Arbeit zu leisten, als die Reibungen zu überwinden; ein solcher Zähler wäre völlig unbrauchbar, da Reibungen das variabelste Element der Mechanik sind.

Er muß also eine Arbeit leisten und diese muß den Gang in der richtigen Weise beeinflussen.

Die Motorzähler wenden übereinstimmend, für die Arbeitsleistung des Motors, ein Prinzip an, welches sich zu diesem Zwecke

besonders gut eignet. nämlich die Erregung von Induktionsströmen in einer am Motor befestigten Kupferscheibe durch feststehende, dicht über der Scheibe gelagerte Magnete. Hierdurch entsteht eine Zugkraft, welche die Bewegung der Scheibe und damit auch des Motors hemmt und proportional der Geschwindigkeit der letzteren wirkt. Im Bewegungsgleichgewicht ist diese Bremskraft gleich der Zugkraft, welche in dem Motor von dem feststehenden auf den drehbaren Teil ausgeübt wird; ist die letztere proportional dem zu messenden Strome, so wird die Geschwindigkeit des Motors proportional dieser Stromstärke: ist


Fig. 78.



dieselbe proportional der zu messenden elektrischen Energie, so wird die Geschwindigkeit proportional dieser Energie. Man kann also, nach diesem Prinzip, sowohl Amperestunden- oder Coulombzähler, als Wattstunden- oder Energiezähler konstruieren.

Der älteste dieser Zähler, welcher große Verbreitung gefunden hat und obiges Prinzip zum ersten Male anwendete, ist derjenige von Hummel oder der A.-G. S. Schuckert & Co. für Gleichstrom (1891).

Bei demselben besteht (s. Fig. 78) der treibende Motor aus einer nach Art der Trommelanker bewickelten Kugel, die kein Eisen enthält, zur Hälfte frei liegt und gegen deren Kommutator

(oben unter der Deckscheibe) zwei Federn schleifen; die rechte Hälfte dieses Motorankers bewegt sich in der halbkugelförmigen Höhlung einer mit dickem Draht bewickelten Rolle, die Achse trägt oben unter dem Kommutator eine Kupferscheibe, deren linker Rand sich zwischen den Polen eines links aufgestellten, durch zwei vertikale Stromrollen erregten Elektromagnets bewegt.

Ein konstanter Strom, z. B. von den Sammelschienen einer elektrischen Zentralanlage ausgehend, geht durch die Rolle des Elektromagnets und den in Bewegung befindlichen Anker. Der letztere entwickelt allerdings eine von der Geschwindigkeit abhängende elektromotorische Gegenkraft, welche die Konstanz dieses Stromes beeinträchtigt; allein dieselbe ist nicht groß und von geringem Einfluß, weil die Elektromagnetrollen dem Anker vorgeschaltet sind.

Der zu zählende Verbrauchsstrom geht durch die rechtsstehende Rolle, d. h. den Schenkel des Motors, welcher, wie der Anker, kein Eisen enthält. Wird kein Strom verbraucht, geht also kein Strom durch diesen Schenkel, so steht der Anker still; sowie Strom verbraucht wird und durch den Schenkel geht, so setzt sich der Anker in Bewegung; da die letztere in der oben auseinandergesetzten Weise durch die in der Kupferscheibe entstehenden Induktionsströme gebremst wird, so ist die Geschwindigkeit des Ankers proportional der verbrauchten Stromstärke, und das mit dem Anker gekuppelte (in der Figur nicht ersichtliche) Zählwerk gibt den Stromverbrauch in Amperestunden an.

Wie bei allen derartigen Zählern, so trat auch bei diesem die Schwierigkeit auf, daß die Reibungen in den Achsenlagern und dem Kommutator nie ganz beseitigt werden können und einen mechanischen Widerstand bilden, zu dessen Überwindung ein gewisser Teil des Verbrauchsstromes nötig ist und welcher bei schwachem Verbrauchsstrome den Anker verhindert, sich überhaupt in Gang zu setzen. Um diesen Widerstand zu überwinden, sind einige Windungen des konstanten (Spannungs-) Stromes zu denjenigen des Verbrauchsstromes auf dem Schenkel hinzugefügt; die durch die mechanischen Widerstände entstehenden Fehler sind hierdurch vermindert. Prinzipiell ist dieses Mittel nicht richtig, denn der Anker läuft nun durch den Einfluß jener korrigierenden Wickelung auch dann, allerdings langsam,

wenn gar kein Strom verbraucht wird; da aber im ganzen für die Stromzählung nur eine Genauigkeit von einigen Prozenten verlangt wird, so genügt diese Korrektion doch dem praktischen Bedürfnis.

Die schwierigste Aufgabe, welche der Motorzählerkonstruktion gestellt wurde, war die Zählung der Wechselströme, welche namentlich bei der rapiden Entwickelung des Dreh- oder Dreiphasenstromes im Anfang der 90er Jahre des vorigen Jahrhunderts in gebieterischer Weise gefordert wurde.

Da das Elektrodynamometer, wenn richtig behandelt, direkt die Energie des Wechselstromes mit Berücksichtigung der Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung mißt, so war das Nächstliegende, die Gleichstromzähler in dynamometrischer Richtung auszubilden und auch für Wechselstrom geeignet zu machen.

Der Aronzähler, bei welchem die elektrische Energie die Bewegung des Zählers nicht zu leisten, sondern nur zu verändern hat, ließ sich am einfachsten für Wechselstrom einrichten; bei den Motorzählern dagegen stellten sich wesentlich dieselben Schwierigkeiten ein, wie bei der Konstruktion der Wechselstrommotoren, und es kamen noch andere hinzu, welche die richtige Zählung des Wechselstromes durch einen Motor mit sich bringt, und welche meist elektrischer Natur sind.

Induktionszähler. Ein Nachteil der dynamometrischen Wechselstromzähler, welcher bei denselben in erhöhtem Maße aufzutreten scheint als bei Gleichstrommotorzählern, ist die Reibung am Kommutator und dessen Abnutzung durch Funken; es war daher nur natürlich, daß, als man anfing, asynchrone Wechselstrommotoren ohne Kommutator zu bauen, dasselbe Prinzip auch auf Zähler angewendet wurde; es entstanden die sogenannten Ferraris- oder Induktionszähler, bei welchen der das Zählwerk treibende Anker aus einer Metallscheibe oder einem Metallzylinder ohne Kommutator besteht, und die in demselben erregten Induktionsströme die treibende Kraft bilden.

Da es uns hier nur darauf ankommt, die Linien der konstruktiven Entwickelung anzugeben und durch Beispiele zu erläutern, beschreiben wir im folgenden als Beispiel kurz den Ferrariszähler für Wechselstrom der Siemens-Schuckert-Werke; S. 85 haben wir bereits darauf hingewiesen, daß dieselbe

magnetelektrische Anordnung auch zu Wechselstrommessungen verwendet werden kann.

Die Figg. 79 und 80 zeigen diese Anordnung.

Der bewegliche Körper ist nicht, wie bei den S. 84 angeführten Ferrarisapparaten, eine Kupferscheibe, sondern ein Zylinder *BB* aus dünnem Aluminiumblech, gegen welchen die bewickelten Eisenkerne *EEFF* gerichtet sind und innerhalb dessen der runde Eisenkern *CC* die magnetischen Felder, welche von jenen Eisenkernen ausgehen, verstärkt. Die Einführung eines Zylinders statt der Scheibe hat nur konstruktive, keine prinzipielle Bedeutung.

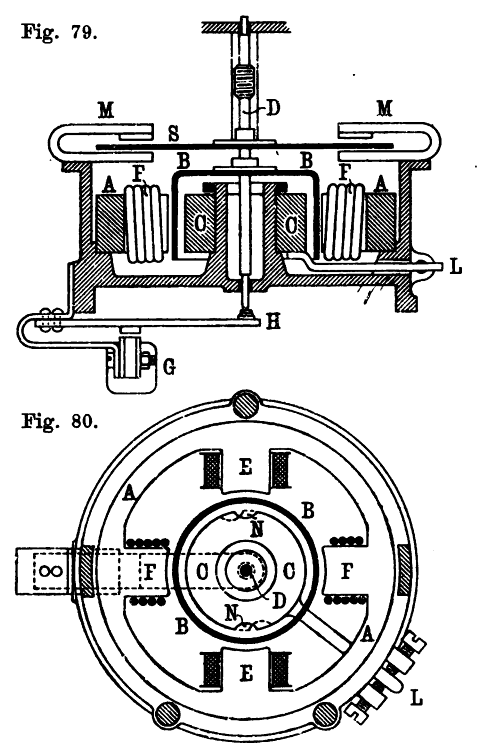


Fig. 79.

Fig. 80.

Die vier (lamellierten) Eisenkerne schließen sich an den Eisenring *A* an. Zwei derselben, *FF*, sind mit dickem Draht bewickelt, zur Aufnahme des Verbrauchsstromes, die beiden anderen, *EE*, zur Aufnahme des Spannungsstromes; die Phase des letzteren wird vor seinem Eintritt in den Apparat genau um 90° verschoben, damit das Drehungsmoment, wie S. 85 auseinandergesetzt, proportional $PJ \cos \varphi$ wird, wo φ der Phasenunterschied zwischen Spannung und Strom. Soll der Zähler den Verbrauchsstrom angeben, so erhalten die Spulen *EE* ebenfalls diesen Strom, aber nach Verschiebung dessen Phase um 90°.

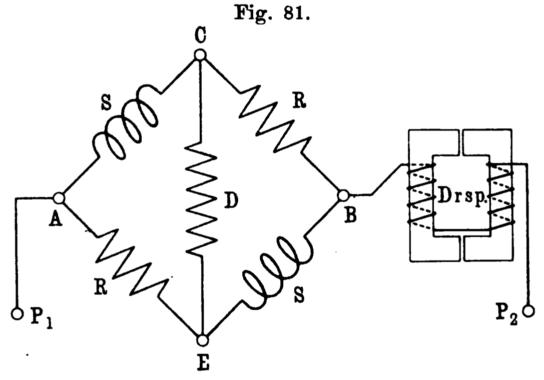
Wie bei den Motorzählern wird die Bewegung elektrisch gebremst durch die Metallscheibe *S*, die sich zwischen den Magneten

MM bewegt; die Geschwindigkeit des beweglichen Körpers wird dadurch proportional dem Drehmoment, also der Energie.

Die künstliche Verschiebung der Phase in den Spulen *E* gegen die Netzspannung um 90° wird durch die Görgessche Brücke (s. Fig. 81) bewirkt. In dieser Schaltung sind $P_1 P_2$ die Spannungspole, die Zweige *SS* mit Selbstinduktion behaftet, die Zweige *RR* und der Diagonalzweig *D* induktionslos, *Drsp* eine Drosselspule mit starker Selbstinduktion; den größten Teil der Phasenverschiebung bewirkt die letztere, der Rest wird justiert durch Wahl des Widerstandes *D*.

Wie die Gleichstrommotorzähler wird auch dieser Zähler bei schwachem Drehmoment durch die Zapfenreibung gehindert, sich

Fig. 81.



in Bewegung zu setzen; fügt man, wie bei dem Hummelschen Zähler, ein kleines Drehmoment zu, das nicht von dem Verbrauchsstrome abhängt, so läuft der Zähler leicht auch dann, wenn kein Strom verbraucht wird. Der Übelstand des Nichtanlaufens wird hier vermieden durch die Nuten *N* in dem Eisenkerne *C*, welche durch den Hebel *L* etwas gegen die Spannungsspulen verschoben werden können, der Übelstand des Anlaufens ohne Verbrauchsstrom durch kleine Einschnitte, die unten im Aluminiumzylinder angebracht sind und die Leitungsbahn der Induktionsströme etwas verschieben. Man kann auf diese Weise, in justierbarer Weise, den Einfluß der Zapfenreibung aufheben, ohne daß Bewegung bei Leerlauf eintritt.

Die Zapfenreibung ist außerdem in Ruhe größer als in Bewegung. Um diesen Widerstand in Ruhe ganz zu beseitigen und

den Apparat gegen äußere Stöße unempfindlich zu machen, wird die Achse *D*, deren unteres Ende *H* auf einer federnden Lamelle gelagert ist, fortwährend in trommelnde Bewegung gesetzt durch den kleinen Elektromagnet *G*, durch welchen ein Teil des Wechselstromes geschickt wird.

Elektrische Registrierapparate.

Ein Registrierapparat ist im allgemeinen ein solcher, der irgend einen Vorgang der Zeit nach aufzeichnet. Derselbe besteht hauptsächlich aus folgenden Einzelapparaten: einem Meßinstrument, welches die Größe, deren zeitlicher Verlauf darzustellen ist, angibt, einer Registriervorrichtung, welche die Angaben des Meßinstrumentes, die sonst nur abgelesen werden, aufzeichnet, und einem motorischen Apparat, z. B. einem Uhrwerke, das den zum Aufzeichnen dienenden Körper, z. B. das sich abrollende Papierband, so in Bewegung setzt, daß auf demselben für jeden Punkt der Aufzeichnung die Zeit angegeben werden kann.

Der elektrische Strom kommt nun in verschiedener Weise bei Registrierungen zur Verwendung; teils kann derselbe behilflich sein bei der Registrierung eines nicht elektrischen Vorganges, teils werden elektrische Vorgänge registriert.

Elektrische Registrierungen; Morse, Le Boulengé, Siemens. Die elektrische Registrierung irgend welcher Vorgänge drängte sich förmlich auf, als man anfing, elektrisch zu telegraphieren und die telegraphischen Zeichen aufzuschreiben. Das Telegraphieren mittels des Spiegelgalvanometers von Gauss und Weber, oder mittels der Zeigertelegraphen, gab keine aufbewahrbare Schrift; sobald aber der elektromagnetische Morseapparat, der eine fixierte Schrift lieferte, in Anwendung kam, war auch das einfachste elektrische Registrieren gegeben; denn man hatte nur, den einzelnen Merkpunkten des zu registrierenden Vorganges entsprechend, telegraphische Zeichen aufzugeben, um dieselben auf dem sich abrollenden Papierbande des Morseapparates auf-

gezeichnet zu erhalten. Da aber das Uhrwerk dieses Apparates ein sehr unvollkommenes ist — da zu dem gewöhnlichen Telegraphieren ein gleichmäßiger Gang des Werkes nicht erfordert wird — mußten der Aufzeichnung Zeitmarken zugefügt werden. Dies geschah in einfachster und genauester Weise dadurch, daß ein Uhrwerk mit einer Kontaktvorrichtung versehen und z. B. jede Sekunde ein Stromimpuls gegeben wurde; auf dem Papierstreifen fanden sich dann nach der Beobachtung nicht nur die Punkte, welche dem zu registrierenden Vorgange entsprechen, sondern auch sichere Zeitmarken verzeichnet, und es konnte aus den letzteren auf die Zeiten, zu welchen jene Punkte gegeben wurden, geschlossen werden.

Diese Registrierung kam namentlich der praktischen Astronomie zugute. Vordem waren, um das Vorbeigehen eines Sternes an den ausgespannten Fäden des Fernrohrokulars zu beobachten, Auge, Ohr und Hand des Astronomen gleichzeitig in Tätigkeit, das Auge, um den Stern und die Fäden zu beobachten, das Ohr, um die Sekundenschläge der Uhr zu zählen und die Zeit einer Fadendeckung durch den Stern auf Sekundenbruchteile zu schätzen, die Hand, um die Zeitpunkte zu notieren; das sichere Zusammenwirken mehrerer Sinne und des Verstandes erforderten große Übung. Sobald die elektrische Registrierung mittels eines Morseapparates und einer mit einem elektrischen Kontakt eingerichteten Uhr in Anwendung kam, müssen die Astronomen eine große Erleichterung empfunden haben.

Aber schon damals zeigte es sich, daß der elektrische Strom nicht etwa auch ein Mittel darbot, um eine genau gleichmäßige Bewegung herzustellen, durch welche z. B. in obigem Falle die Zeitmarken der Uhr in Fortfall gekommen wären; der elektrische Strom konnte dazu benutzt werden, um bei einer Uhr statt der Feder die Bewegung zu unterhalten und zu regulieren, nicht aber zur direkten Herstellung einer genau gleichmäßigen Rotation.

Die vielen Versuche, welche angestellt wurden, um einen Motor mit streng gleichmäßiger Rotation zu konstruieren, schlugen fehl, und es wurde höchstens erreicht, daß ein Motor, z. B. ein Laufwerk, kurze Zeit hindurch wenigstens regelmäßig sich veränderte, so daß man aus der Beobachtung der Umlaufszeiten vor und nach der Registrierung auf die Umlaufszeit während der Registrierung schließen konnte.

In neuester Zeit ist man allerdings diesem Ziele recht nahe gekommen durch elektrische Motoren, welche aus einem Netze mit sehr konstanter Spannung gespeist wurden und zum Antriebe von rotierenden Telegraphenapparaten, die genau synchron laufen mußten, dienen. Die hierzu aufgewendeten Mittel sind indessen ziemlich kompliziert und haben bisher zur Konstruktion von Chronographen keine Anwendung gefunden.

Die einzige Vorrichtung, welche in zuverlässiger Weise bei Registrierungen gleichsam den Takt zu schlagen imstande ist, blieb, wie vor, so auch nach dem Auftreten des elektrischen Stromes das Pendel in seinen verschiedenen Formen, namentlich das Pendel der größeren Uhren, die „Unruhe“ der Taschenuhren und bei schnellen Bewegungen die Stimmgabel.

Eine, wahrscheinlich die einzige, Ausnahme von dieser Regel ist ein Chronograph, dessen Grundlage nicht ein Pendel, sondern der freie Fall eines Körpers bildet, nämlich der Apparat von Le Boulengé, welcher zur Bestimmung der Geschoßgeschwindigkeit bei der Flinte oder der Kanone, oder vielmehr der Zeit, in welcher das Geschoß eine bestimmte Strecke durchläuft, dient.

Der fallende Körper ist bei diesem Apparate ein Zinkrohr, welches durch ein am oberen Ende angebrachtes Eisenstück an einen Elektromagnet angehängt und, wenn die Kugel den Lauf verläßt, infolge des Durchschießens eines vor der Mündung ausgespannten Drahtes und des gleichzeitigen Öffnens des Elektromagnetstromkreises herunterfiel. An dem Anker eines zweiten Elektromagneten war ein Messer befestigt, das gegen das fallende Zinkrohr schlug, sobald an einem als Ziel aufgestellten, mit Kupferdraht bespannten Holzrahmen der Draht von der Kugel durchschossen wurde. Auf dem Zinkrohre war eine Teilung angebracht, an welcher die Entfernung der von dem Messer hervorgerufenen Zielmarke vom Nullpunkte der Skala, also die Weglänge des freien Falles, abgelesen wurde; aus dieser Weglänge ließ sich dann mittels des Gesetzes des freien Falles die Zeit berechnen, in welcher das Geschoß den Weg von der Mündung bis zum Ziele gebraucht hatte.

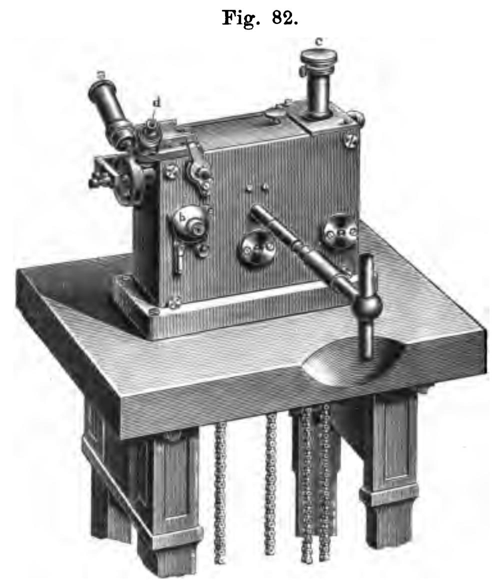
Obschon dieser Apparat nur für zwei Scheiben anwendbar und in bezug auf die Genauigkeit der Messung nicht einwandfrei war, zeichnete er sich durch einfache Handhabung und Abwesen-

heit subtiler Konstruktionsteile aus und hat sich wohl aus diesen Gründen seit etwa 40 Jahren im Gebrauche erhalten.

Wenn die Registrierung durch Elektromagnete mit beweglichen Ankern besorgt wird und die zu messende Zeit klein ist, so dürfen die Zeiten der Veränderung des Magnetismus des Elektromagneten und diejenige der Bewegung des Ankers nicht außer acht gelassen werden und es können hierdurch Fehler entstehen. Dieselben fallen indessen weg, wenn die Registrierung durch einen elektrischen Funken erfolgt, der z. B. aus einer feinen isolierten Metallspitze auf eine rotierende berußte Scheibe überschlägt.

Ein solcher Funkenchronograph (s. Fig. 82) wurde von W. Siemens konstruiert und in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts zur Messung der Geschwindigkeit der Geschosse im Laufe des Gewehres oder des Geschützes und derjenigen des elektrischen Funkens beim Durchlaufen von Telegraphenlinien benutzt.

Fig. 82.



Für die ersteren Messungen waren an dem Laufe, z. B. des Gewehres, eine Reihe von isolierten Drähten angebracht, die in den Lauf hineinragten und von der Kugel beim Schusse zerrissen wurden; jeder Draht war durch eine Leydener Flasche geladen, entlud dieselbe beim Zerreißen und hinterließ auf der rotierenden, berußten Scheibe des Funkenchronographen eine kreisförmige Marke mit einem scharfen Punkte in der Mitte. Die Scheibe rotierte sehr rasch, etwa 100 Umdrehungen pro Sekunde; die Umdrehungszeit wurde vor und nach dem Schusse gemessen, so daß die während des Schusses geltende sich berechnen ließ; die Abstände der

Funkenmarken wurden bei stillstehender Scheibe durch eine Mikrometervorrichtung gemessen und ergaben dann mittels der bekannten Umdrehungszeit die Zeiten, welche die Kugel zum Durchlaufen der betreffenden Strecke gebraucht hatte.

Ein vorzügliches und vielfach angewendetes Zeitmaß für solche Messungen bildet eine tönende Stimmgabel, welche ihre Schwingungen auf einer berußten, unter der Stimmgabel fortbewegten Platte aufschreibt. Die Schwingungsdauer derselben ist, abgesehen von dem bestimmbaren Einfluß der Temperatur, konstant und mit aller Genauigkeit meßbar; werden auf der Platte neben den Schwingungskurven die zur Messung dienenden Zeitmarken hervorgebracht, so lassen sich die Zeitunterschiede vermittelst der Schwingungskurven recht genau bestimmen.

Bei dieser Art der Messung wird dann meistens das Schwingen der Stimmgabel auf elektrischem Wege unterhalten, in der bekannten Weise, wie bei einem Induktionsapparate das Schließen und Öffnen des primären Kreises durch den Wagnerschen Hammer erfolgt, nämlich dadurch, daß die Pole eines Elektromagneten vor die Zinken der Stimmgabel gelagert werden und dieselben abwechselnd anziehen und freilassen infolge des Spieles eines an der Stimmgabel sitzenden Kontaktes.

Registrierung elektrischer Vorgänge: Richard, Bäderspannung, Rußschreiber. Wenden wir uns nun zu denjenigen Registrierungen, bei welchen nicht der elektrische Strom zu der Ausführung der Registrierung dient, sondern ein elektrischer Vorgang den Zweck der Registrierung bildet, und zwar zunächst zu langsamen elektrischen Vorgängen, namentlich dem Verlaufe von Spannung und Strom, eventuell Energie, auf einer elektrischen Zentralstation.

Bald nach Errichtung größerer Anlagen für elektrische Beleuchtung und Kraftübertragung trat das Bedürfnis hervor, den Verlauf derjenigen elektrischen Werte, welche stark wechseln, fortlaufend selbsttätig zu registrieren. Im Anfang der Entwickelung der elektrischen Zentralen, als Fabriken und Häuserkomplexe einzeln mit Licht und Kraft versehen wurden und die Abnahme von Strom im wesentlichen eine regelmäßige war, dachte man weder an Zähler, noch an Registrierapparate; je komplizierter die Stromabnahme und Verrechnung wurde, desto

notwendiger wurden Zähler bei den einzelnen Stromabnehmern; und noch später fing man an, elektrische Registrierapparate in den Maschinenräumen aufzustellen, um sichere, von persönlicher Beobachtung freie Daten für den Verlauf von Strom oder Spannung zu erhalten und daraus und aus dem Kohlenverbrauch auf die Ökonomie der elektrischen und Dampfmaschinen zu schließen oder andere Betriebsfragen zu untersuchen.

Auf diesem Gebiete war vielfache Vorarbeit vorhanden in den metereologischen Registrierapparaten für Temperatur, Luftdruck, Feuchtigkeit usw. Obschon diese Apparate im Laufe der Zeit sich schon wesentlich, in Konstruktion und Behandlung, vereinfacht hatten, genügte dieses Vorbild nicht für elektrische Zentralen; denn die Beaufsichtigung der letzteren stellte noch größere Anforderungen an Einfachheit der Konstruktion, Leichtigkeit der Behandlung und billigen Preis.

Der erste, welcher auf diesem Gebiete entschiedenen Erfolg erzielte, war Richard in Paris anfangs der 90er Jahre des vorigen Jahrhunderts, und zwar namentlich dadurch, daß er in dem hergebrachten System der Aufzeichnung von Kurven die geradlinigen Ordinaten ersetzte durch kreisbogenförmige. Hierdurch war für den Konstrukteur eine wesentliche Schwierigkeit beseitigt, da beinahe bei allen Meßinstrumenten, deren Angaben zu registrieren sind, der Zeiger sich um eine Achse dreht, also seine Spitze Kreisbögen beschreibt, und es unserer heutigen graphischen Technik ein Leichtes ist, endlose Papierbänder mit einem Netz aus geradlinigen Abszissen und kreisbogenförmigen Ordinaten (Fig. 83) zu bedrucken; für jeden Punkt einer auf einem solchen Netz gezeichneten Kurve läßt sich der zugehörige Wert der Abszisse ebenso gut bestimmen, wie bei geradlinigen Ordinaten. Der Konstrukteur konnte nun bei dieser Anordnung den Zeiger des Meßinstrumentes unmittelbar über dem durch ein Uhrwerk gleichmäßig fortbewegten Papierbande spielen und seine Angaben aufzeichnen lassen, während die Umwandlung der Kreisbogen in Grade bei früheren Anordnungen stets eine schwierige und Komplikationen mit sich bringende mechanische Aufgabe war.

Fig. 83.

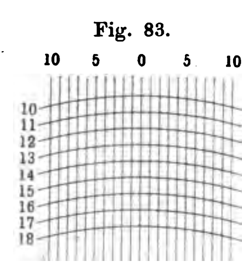


Fig. 84 stellt ein registrierendes Amperemeter von **Richard** dar. Der bewegliche Teil besteht aus zwei um eine Achse drehbaren Eisenblechen, welche sich über flachen Drahtwickelungen bewegen; der Zeiger spielt über dem in angegebener Art bedruckten, sich abrollenden Papierband; die Aufzeichnung geschieht mittels einer Tinte, die schwer trocknet und beim Schreiben wenig Reibung verursacht.

Fig. 84.



Ähnliche Instrumente fertigen heutzutage eine Reihe von Firmen an für die Registrierung von Ampere, Volt, Energie usw., und der Leiter einer modernen elektrischen Zentralanlage kann jederzeit für den Eintritt irgend einer Veränderung aus seinen Diagrammen den Zeitpunkt bestimmen, die wirklich geleistete Energie berechnen und mit dem Verbrauch an Brennmaterial vergleichen, und andere Aufgaben lösen.

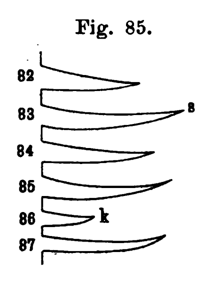
Eine Aufgabe anderer Art ist die Registrierung von solchen Beobachtungen, welche regelmäßig und in großer Anzahl angestellt werden müssen; dies kommt vor in großen elektrolytischen Anlagen mit vielen Hunderten von Zersetzungsbädern, in denen der Strom im wesentlichen konstant ist, aber die Spannung jedes einzelnen Bades täglich wenigstens einmal gemessen werden muß, um zu beurteilen, ob das Bad nicht etwa Kurzschluß, durch Berührung der Elektroden, hat und daher nicht arbeitet, oder ob ein schlechter Kontakt vorhanden ist und das Bad daher zu viel elektrische Energie absorbiert; im ersteren Fall ist die Spannung Null oder ungewöhnlich gering, im letzteren ungewöhnlich hoch.

Solche Apparate sind im Betrieb in den großen elektrolytischen Kupferraffinieranlagen in Montana (Amerika) und in Oker (Harz).

Für diese Apparate ist von jeder Verbindungsstelle zwischen zwei benachbarten Bädern ein Kupferdraht an die Meßstelle ge-

führt, so daß daselbst die betreffende Spannungsdifferenz durch Einschalten eines passenden Voltmeters zwischen zwei aufeinander folgende Drähte erfolgen kann. Um diese Einschaltung selbsttätig zu machen, bewegt sich nach Ingangsetzung des Registrierapparates ein radialer Kontakthebel über die kreisförmig angeordneten Endpunkte jener Leitungen und zwar so, daß zwei benachbarte Endpunkte eine gewisse kleine Zeit am Voltmeter liegen, dann aber die Verbindungen gelöst werden, damit der Zeiger des Voltmeters auf Null zurückschwingen kann. Unter dem aperiodisch schwingenden Voltzeiger bewegt sich ferner gleichmäßig ein mit Teilung, z. B. in Hundertstel Volt, und mit den Nummern der Bäder versehenen Papierstreifen, auf welchem der Voltzeiger seine Bewegungen registriert. Hat man daher den Apparat ausgelöst, so erscheinen auf dem Papier die den einzelnen Spannungsmessungen entsprechenden Bewegungen des Zeigers in der in Fig. 85 angedeuteten Weise, und es genügt ein Blick auf die Registrierung, um die Bäder mit Kurzschluß, wie *k*, und diejenigen mit schlechtem Kontakt, wie *s*, aufzufinden.

Fig. 85.



Während so das Bedürfnis des ausübenden Elektrotechnikers nach Registrierapparaten volle Befriedigung fand, entwickelten sich auch Bemühungen, die elektrischen Kurven, deren der konstruierende und rechnende Elektriker bedarf, empirisch aufzuzeichnen.

Eine solche Kurve ist diejenige des aufsteigenden Stromes in langen Kabeln, oder die Kurve, welche an dem empfangenden Kabelende der Strom beschreibt, wenn am gebenden Ende die Batterie dauernd angelegt wird.

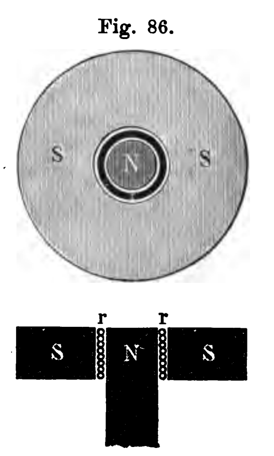
Diese Kurve hatten in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts Sir W. Thomson und Stokes zur Grundlage einer Theorie der Kabelströme gemacht, welche gestattete, die Wirksamkeit der verschiedenen Telegraphiersysteme zu berechnen, und welche offenbar im wesentlichen sich auch in Übereinstimmung mit der Wirklichkeit befand, obschon eine empirische Aufzeichnung derselben und Vergleichung mit der Theorie nicht stattgefunden hatte oder wenigstens nicht veröffentlicht worden ist. Diese Theorie kann aber nicht ganz mit der Wirklichkeit

übereinstimmen, da die Erscheinungen des elektrischen Rückstandes, welche bei Guttaperchakabeln so stark sind, in dieser Theorie nicht berücksichtigt sind.

Als man nun in Deutschland anfing, unterirdische Guttaperchakabel zu legen, zeichnete der Verfasser, Ende der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts, diese Kurven an einigen der neuen Kabel auf und zwar an einem Instrumente, das für Kabeltelegraphie bestimmt war, sich aber auch für diesen Zweck eignete.

Fig. 86 zeigt die Disposition dieser Aufzeichnung des Rußschreibers von Siemens u. Halske; es ist ein aus Aluminiumdraht auf Aluminiumblech aufgewickeltes Röllchen *r*, welches in einem kreisförmigen magnetischen Felde zwischen *N* und *S* schwebt und sich auf- oder abwärts bewegt, wenn ein elektrischer Strom durchgeht; es ist dies das System des submarinen Relais von W. Siemens. Das Röllchen ist an einer Torsionsfeder aufgehängt und bewegt eine Schreibspitze *p*, die mit einer dünnen Flachfeder an einem Fixpunkt befestigt ist und die Bewegungen des Röllchens mit seiner Spitze wiedergibt (s. Fig. 87). Unter der Spitze bewegt sich ein Papierband, welches, bevor es die Spitze erreicht, in *m* über einem Metallkörper schleift und dort von einer geeigneten Flamme schwach berußt wird; die Spitze schreibt auf demselben, indem sie den Ruß wegwischt; nachher gelangt das Band in ein Bad *c* mit alkoholischer Harzlösung, geht dann über ein erhitztes Metallstück, so daß beim Verlassen des Apparates, hinter dem Uhrwerk *e*, die beschriebene Rußschicht fixiert ist.

Fig. 86.



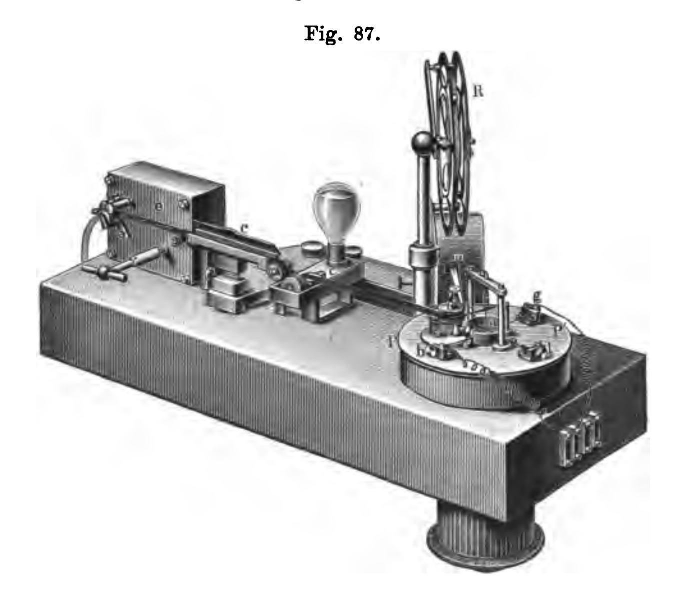
Auf diese Weise wurde z. B. die Fig. 89 kurz wiedergegebene Kurve des aufsteigenden Stromes an einer bestimmten Kabelschleife empirisch aufgezeichnet und gestattete die Vergleichung mit der oben angeführten Theorie.

In dieser Kurve gibt die obere Linie den Strom am Ende des Kabels, die untere Linie die Bewegung des vor dem Kabel stromgebenden Tasters. *adg* sind Sekundenmarken, *b* der An-

fang, *e* das Aufhören des Stromes; die zwischen *c* und *f* liegende Kurve ist diejenige des aufsteigenden, die hinter *f* liegende diejenige des abfallenden Stromes, *c* und *f* sind kleine Induktionsstöße, welche in dem beim Versuch neben dem Kabelanfang belegenen Kabelende durch Schließung bzw. Öffnung des Stromes erregt wurden und sachlich nicht in Betracht kommen.

In neuerer Zeit haben sich nun der so schnell fortschreitenden Elektrotechnik zwei Aufgaben gestellt, in welchen sehr schnell

Fig. 87.



verlaufende periodisch regelmäßige Erscheinungen zu registrieren waren, nämlich die Kurven der *magnetischen Hysteresis im Eisen* und diejenigen der *technischen Wechselströme*.

Die Behandlung der ersteren Aufgabe möchten wir, als nicht in den Rahmen unserer Schrift fallend, nicht näher erörtern und bemerken nur, daß es bereits Apparate gibt, welche diese Aufgabe lösen.

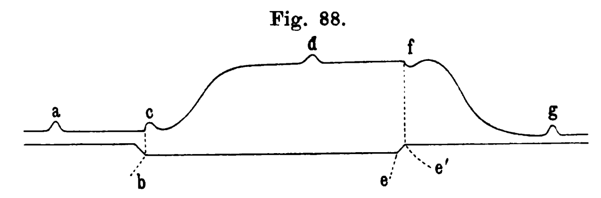
Die *Registrierung der Wechselstromkurven* dagegen möchten wir kurz besprechen.

Oszillographen. Die Wechselstromtechnik, welche sich in neuester Zeit so schön entwickelt, erhielt ein wichtiges Hilfs-

mittel, als es möglich wurde, die Kurven für Strom oder Spannung, wie sie im Stromkreis wirklich vorhanden sind, aufzuzeichnen.

Vorher war man auf Messungen der früher geschilderten Instrumente angewiesen; dieselben lieferten jedoch nur Mittelwerte der elektrischen Größen, nicht die charakteristischen Einzelheiten der elektrischen Kurven; noch weniger konnten dem Experimentierenden theoretische Betrachtungen helfen.

Fig. 88.



Es gab allerdings Methoden, um solche Kurven Punkt für Punkt durch Messung zu bestimmen. Man brachte z. B. an einer bestimmten Stelle des rotierenden Ankers ein Kontaktstück an, welches während jeder Umdrehung einmal an einer feststehenden Kontaktfeder den Strom einen Augenblick durch das Instrument schickte. Im Instrumente erschien alsdann eine konstante Ablenkung, welche einem Punkt der zu bestimmenden Kurve entsprach; indem jenes Kontaktstück an verschiedenen Stellen angebracht wurde, ergaben sich eine Reihe von Punkten der Kurve.

Diese Methode war indessen mühsam und setzte Veränderungen der Maschine voraus; das Bedürfnis des Technikers, welcher die Kurve jedes Stromes, den er durch den betreffenden Apparat leitet, rasch besitzen möchte, war hierdurch nicht befriedigt.

Diese Aufgabe kann nur dadurch gelöst werden, daß der Apparat selbstätig die Stromkurve, d. h. eine dieselbe darstellende leuchtende Linie, stehend im Raume gibt, welche dann direkt betrachtet oder photographiert werden kann, so daß alle Einzelheiten der Kurve ausgemessen werden können.

Solche Kurven gab zuerst der vom Verfasser konstruierte[1]) Apparat, mit welchem auch 1891 in der elektrischen Ausstellung zu Frankfurt a. M. akustische und elektrische Kurven, stehend im Raum, dem Publikum vorgezeigt wurden.

---

[1]) E. T. Z. 1889, S. 64. O. Frölich.

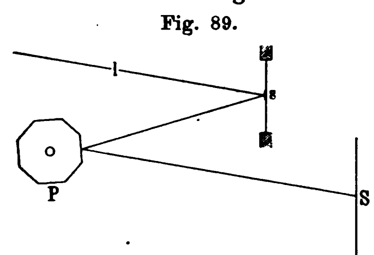
Daß die Registrierung dieser sehr schnell verlaufenden Kurven nicht auf mechanischem Wege erfolgen könne, versteht sich von selbst, denn jeder bewegliche Körper besitzt eine gewisse Trägheit, welche sehr wesentliche Entstellung dieser Kurven bewirkt. Es kann nur hierzu der Lichtstrahl angewendet werden, welcher keine Trägheit hat.

Die Aufgabe zerfällt alsdann in zwei Teile. Es ist ein Meßapparat zu konstruieren, dessen beweglicher Teil möglichst genau dem Verlauf des Wechselstromes folgt, so daß auch ein von demselben reflektierter Lichtstrahl sich entsprechend bewegt, d. h. in einer geraden Linie, welche derselbe entsprechend der Stromkurve, bald schneller, bald langsamer durchläuft. Sodann muß eine Art „beweglichen Schirmes" den wandernden Lichtstrahl auffangen, und durch seine Bewegung die Kurven gleichsam auseinanderziehen.

In der Physik wird nun vielfach zu ähnlichen Zwecken als beweglicher Schirm der rotierende Spiegel verwendet, d. h. ein oder mehrere, z. B. um eine vertikale Achse rotierende Spiegel, auf welche der z. B. auf und ab sich bewegende horizontale Lichtstrahl fällt; wenn man in die Spiegel blickt, so erscheint die Bewegung des Lichtstrahles als Kurve auseinander gezogen. Nun hatte auf diese Weise die akustische Erscheinung der sogenannten tanzenden Flammen die Funkenentladung der Leydener Flasche usw. analysiert.

Bei dieser Einrichtung jedoch wandern die Bilder oder laufen durcheinander und gestatten keine nähere Beobachtung, außer durch Momentphotographie; sie werden jedoch im Raum stehend, wenn die Umdrehungsgeschwindigkeit des Spiegels in einem einfachen Zahlenverhältnis zu der Schwingungsdauer der zu untersuchenden akustischen oder elektrischen Wellen steht. Dieses Prinzip des Synchronismus wurde zuerst bei dem in Rede stehenden, dann bei allen später konstruierten Oszillographen angewendet.

Fig. 89.



Als Meßapparat verwendete der Verfasser das Telephon, das ja die Form der dasselbe durchfließenden elektrischen Ströme

mit so wunderbarer Genauigkeit wiedergibt. Auf die vertikal gestellte Membran desselben wurde seitlich ein Spiegelchen *s* geklebt; wenn (s. Fig. 89) ein horizontaler, kräftiger Lichtstrahl *l* auf dasselbe geworfen, von da auf einen rotierenden Polygonalspiegel *P* und von da auf einen festen Schirm *S* geworfen wurde, so sah man auf dem letzteren die feststehende Kurve eines periodisch das Telephon durchlaufenden Stromes; hierbei war der Spiegel mit dem den Strom erzeugenden Apparat, einer Wechselstrommaschine oder einem eine Batterie schließenden und öffnenden Kommutator, mechanisch so gekuppelt, daß einer Umdrehung des Spiegels eine ganze Anzahl elektrischer Wellen entsprach.

Zum Photographieren der Kurven wurde als fester Schirm die geschlossene photographische Kassette benutzt, deren Verschlußdeckel für die Aufnahme einen Augenblick geöffnet wurde.

Als Lichtquelle diente eine Bogenlampe; die Rolle des „beweglichen Schirmes" spielte hier der rotierende Polygonalspiegel.

Auf diese Weise wurden z. B. die in Fig. 90 bis 93 dargestellten Kurven erhalten.

Fig. 90 gibt die Stromkurve in der primären Wickelung eines Induktionsapparates ohne Eisenkern, wenn die Batterie

Fig. 90.



geschlossen und geöffnet wird, Fig. 91 diejenige der sekundären Wickelung. Man sieht die Verzögerung des Ansteigens des

Fig. 91.



primären Stromes infolge der Induktion, und die Verzögerung beim Abfallen; diesen beiden Momenten entsprechen die Induk-

tionsstöße im sekundären Kreis; es ist Strom von einer Wickelung in die andere hinübergewandert.

Fig. 92 zeigt die Spannungskurve, Fig. 93 die Stromkurve in dem äußeren, mit Selbstinduktion behafteten Kreis einer

Fig. 92.



Wechselstrommaschine. Die beiden Lücken in den Kurven bezeichnen denselben Zeitmoment; man sieht das Verschieben des

Fig. 93.



Maximums oder das Vorhandensein eines Phasenunterschiedes zwischen Strom und Spannung. Fig. 94 und 95 zeigen Kurven

Fig. 94.



desselben Wechselstromes am gebenden und am empfangenden Ende eines Kabels und deren Phasenunterschied.

Fig. 95.

Der Oszillograph der Siemens-Schuckert-Werke unterscheidet sich von dem vorstehenden Apparate in mehrfacher Beziehung.

Statt des Telephons ist als Meßapparat die Blondelsche Meßschleife, welche wir S. 64 erwähnt haben, angewendet. Dieselbe zeichnet sich namentlich dadurch aus, daß die Eigenschwingungen des Meßapparats, welche in den obigen Bildern bei langsam verlaufenden Vorgängen, wie Fig. 91, 92, deutlich als ein Zittern der Kurve auftreten, noch erheblich weniger wirken können, da sie sehr schnell, etwa in 6000 Perioden pro Sekunde, verlaufen; dies wird erreicht durch starkes Anspannen der Blondelschen Schleifdrähte.

Als Rotationsapparat dient ein synchroner Wechselstrommotor, der auf einer Seite der Achse den Zylinder, auf welchem das lichtempfindliche Papier befestigt ist, auf der andern Seite den Beobachtungsapparat trägt. Der Synchronismus zwischen der Stromquelle und dem „beweglichen Schirm" ist also auch hier vorhanden und zwar so, daß der Apparat an jeden beliebigen Wechselstrom angeschlossen werden kann. Der „bewegliche Schirm" ist hier nicht ein rotierender Polygonalspiegel, sondern ein rotierender Zylinder für das Photographieren, ein rotierender prismatischer Körper zum Beobachten. Der letztere hat eine eigenartige Form, die so gewählt ist, daß bei synchronem Gang die zu beobachtende Kurvenform dem Auge scheinbar stille stehend und dauernd sichtbar gemacht wird.

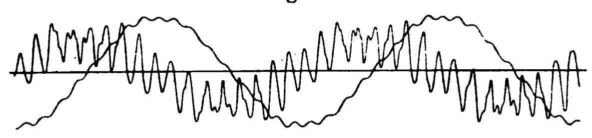
Als Lichtquelle dient eine Nernstsche Glühlampe.

Der ganze Apparat hat kompendiöse Form und ist von einem Kasten umgeben; in einer dunkeln Höhlung desselben kann die Kurve stets beobachtet werden. Will man photographieren, so drückt man auf einen Knopf; ein Spiegel wird hierdurch so gedreht, daß der Lichtstrahl auf das lichtempfindliche Papier fällt und die photographische Aufnahme erfolgt. Es kann also jederzeit, beim Auftreten einer interessanten Kurve, dieselbe sofort photographiert werden.

Fig. 96 und 97 stellen Aufnahmen dieses Apparates dar, an welchem sich die ungemeine Schärfe zeigt, mit welcher der Apparat die kleinsten Einzelheiten wiedergibt. Beide Figuren stellen Strom und Spannnng an einem von einer Wechselstrommaschine gespeisten Kondensator dar, entsprechen jedoch verschiedenen Maschinen.

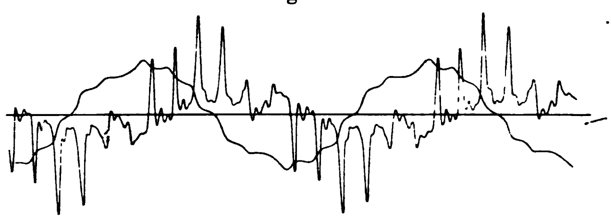
Bei dem „Rheograph" von Abraham (ausgeführt von Carpentier, Paris) diente als Meßinstrument eine außerordent-

Fig. 96.



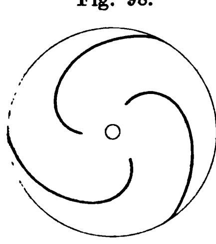
lich leichte und kleine, mit Spiegel versehene Drehspule, die sich in einem kräftigen magnetischen Felde bewegt.

Fig. 97.



Der Lichtstrahl fällt auf eine feststehende vertikale Spalte, vor welcher sich ein Schirm aus Aluminiumdraht, in welchem drei spiralförmige Spalten (s. Fig. 98) ausgeschnitten sind, befindet. Der Lichtstrahl kann nur in das Innere der Dunkelkammer dringen, wenn ein Punkt einer Spirale und ein Punkt der festen Spalte *s* sich decken; derselbe erzeugt daher auf einer mattgeschliffenen Glasplatte, die eine Fläche der Dunkelkammer begrenzt und von außen betrachtet werden kann, einen vertikal auf und ab wandernden Lichtpunkt, und zwar ist die Gestalt der Spiralen derart, daß diese Wanderung ganz gleichmäßig erfolgt und der Lichtpunkt, wenn er am oberen Ende der geraden Linie angelangt ist, plötzlich nach dem unteren Ende zurückspringt und die Linie von neuem nach oben hindurchläuft.

Fig. 98.



Dies ist jedoch nur der Fall, wenn kein Strom durch das Meßinstrument geht und sein Spiegel sich in der Ruhelage befindet. Wird die Drehspule und mit ihr der Spiegel abgelenkt,

so bewegt sich der wandernde Lichtpunkt seitwärts und beschreibt, statt der geraden Linie, eine Kurve, die Stromkurve, welche sowohl betrachtet, als nach Einschieben einer photographischen Kassette photographiert werden kann.

Es sind ferner zwei mit Spiegeln versehene Meßinstrumente neben einander aufgestellt; die Lichtstrahlen, welche von beiden Spiegeln ausgehen, fallen auf dieselbe Vertikalspalte, so daß beide in der Ruhelage der Spiegel dieselbe vertikale Lichtlinie beschreiben. Sind die Ströme, welche durch die beiden Instrumente gehen, verschieden, so entstehen auf der matten Glasplatte gleichzeitig zwei verschiedene Stromkurven, z. B. entsprechend der Stromstärke und der Spannung eines Wechselstromes.

Der „bewegliche Schirm", den wir in diesen Apparaten immer wiederfinden, ist hier die sich drehende Aluminiumscheibe mit den spiralförmigen Einschnitten. Der Synchronismus zwischen dieser Scheibe und dem Wechselstrome ist, wie bei dem Apparat von Siemens-Schuckert, dadurch hergestellt, daß die Scheibe durch einen von dem Wechselstrome betriebenen Synchronmotor gedreht wird.

Die Fehler, welche durch die Eigenbewegungen der Drehspulen entstehen, werden durch Zuhilfenahme von Induktionen in besonderen kleinen Transformatoren kompensiert.

Die Widerstandsmesser.

In der ganzen modernen Entwickelung der elektrischen Meßinstrumente herrscht der Zug, alle gewöhnlichen Messungen durch Instrumente mit direkter Ablesung vorzunehmen, so daß nur die Vornahme der Schaltung und die Ablesung der Ablenkung zur Messung nötig sind und jedermann, namentlich auch Arbeiter, dieselbe ausführen können. Diese Fortbildung hat zuletzt auch dasjenige Feld ergriffen, welches bisher die am weitesten verbreitete elektrische Meßmethode, die Wheatstonesche Brücke,

völlig beherrschte, nämlich die Widerstandsmessung. Es war dies auch ganz natürlich; denn eine Reihe von Widerstandsmessungen, die in einer elektrotechnischen Fabrik zu Hunderten täglich auszuführen sind, wie die Widerstandsbestimmung an Drahtwickelungen für Meßinstrumente, telegraphische und telephonische Apparate, Kohlenfäden für Glühlampen usw., verlangen keine große Genauigkeit, aber möglichste Ersparnis an Zeit; auch für die Isolationsbestimmung an außer Betrieb gesetzten elektrischen Anlagen war eine Vereinfachung wünschenswert und nur geringe Genauigkeit erforderlich. Infolgedessen wurden mehrfach Ohmmeter konstruiert, d. h. Widerstandsmesser mit direkter Ablesung.

Die Lösung dieser Aufgabe bietet sich eigentlich von selbst dar. Wie ein Strommesser von bekanntem Widerstand zur Spannungsmessung benutzt werden kann, so kann er auch bei bekannter Spannung zur Widerstandsmessung benutzt werden. Man hat also nur eine Batterie von genügend konstanter Spannung mit einem geeigneten Strommesser zu kombinieren und kann dann den letzteren mit einer Skala versehen, welche direkt den zu dem Strommesser zugeschalteten, unbekannten Widerstand in Ohm abzulesen gestattet.

Diesen Weg haben auch mehrere der bekanntesten Firmen, z. B. Siemens-Schuckert, Hartmann u. Braun, eingeschlagen. Als Strommesser dienten die mit Recht so vielfach verwendeten Drehspulgalvanometer, als Batterie kleine, von Hand zu drehende Magnetmaschinen, oder besser einige Akkumulatoren. Indessen, obgleich nur geringe Genauigkeit nötig war, stellte sich das Bedürfnis heraus, die Schwankung der Akkumulatorenspannung, die, je nach dem Stande der Entladung, bis 15 Proz. betragen kann, bei der Messung zu berücksichtigen. Dies geschah mehrfach in der Art, daß man das magnetische Feld des Drehspulgalvanometers durch ein verschiebbares Eisenstück, den sogenannten magnetischen Nebenschluß, so regulierte, daß bei Einschaltungen eines bekannten Widerstandes der abgelesene Widerstand richtig war.

Der Einfluß der Meßspannung auf die Widerstandsmessung läßt sich jedoch ganz beseitigen. Maxwell hat gezeigt, daß, wenn man zwei Wickelungsspulen ineinander, aber senkrecht zueinander stellt, von derselben Batterie aus durch verschiedene

Widerstände verschiedene Ströme durch die Wickelungen schickt, und in den gemeinschaftlichen Mittelpunkt eine freischwebende Magnetnadel bringt, so ist die Ablenkung der letzteren im wesentlichen unabhängig von der Spannung der Batterie, wenn gegenüber den Wirkungen der Wickelungen diejenige des Erdmagnetismus verschwindet.

Fig. 99.

Um diesen Gedanken so auszuführen, wie es der Gebrauch des Instrumentes verlangt, hat Carpentier (s. Fig. 99) ein doppeltes Drehspulgalvanometer konstruiert, bei dem die magnetischen Achsen der beiden übereinander liegenden Magnetsysteme senkrecht aufeinander stehen, wie auch die Drehspulen, die letzteren aber fest miteinander und mit demselben Zeiger *r* verbunden sind. Da bei dieser Anordnung der Erdmagnetismus sowie benachbarte Ströme und Magnete außer Betracht fallen, und es nur auf die beiden elektromagnetischen Kräfte und diejenige der Torsionsfedern ankommt, so ist die Ablenkung unabhängig von der Spannung der Batterie, und hat man bei der Wahl derselben nur darauf zu achten, daß deren Spannung nicht so hoch ist, daß schädliche Erwärmungen der Wickelungen entstehen.

Elektrische Geschwindigkeitsmesser.

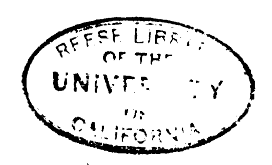
Eine einfache und recht nützliche Anwendung der elektrischen Maschinen besteht in der Messung der Geschwindigkeit irgend einer Drehachse. Zu diesem Zweck wird auf die letztere ein Maschinchen, das durch eine zweckmäßig gewählte Übersetzung angetrieben, gesetzt, das entweder Gleichstrom oder Wechselstrom liefert,. und statt der sonst angewendeten Elektromagnete permanente Magnete besitzt, und die Polspannung des Maschinchens an einem Voltmeter abgelesen; die Polspannung

ist alsdann genau proportional der Drehungsgeschwindigkeit der Achse, es kann daher die Skala des Voltmeters direkt in Umdrehungszahlen per Minute eingeteilt werden.

Gleichstrom wird gewählt, wenn die Welle sich stets in demselben Sinne dreht, Wechselstrom, wenn die Drehung bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne erfolgt.

Das Meßinstrument wird so gewählt, daß die Schwingungen des beweglichen Teiles stark gedämpft sind und daß Erschütterungen, z. B. bei der Aufstellung in einem Eisenbahnwagen, demselben möglichst wenig anhaben.

Solche Geschwindigkeitsmesser sind von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft konstruiert und, z. B. bei den bekannten Schnellbahnversuchsfahrten bei Berlin 1902, mit gutem Erfolg angewendet worden.



Die Mefsmethoden.

Wir gelangen nun zur Besprechung derjenigen Kombinationen, welche zu elektrischen Messungen dienen und nicht bloß in einem geeigneten Instrumente bestehen, sondern auch außerdem in Schaltungen, Widerständen und anderen Körpern von bestimmten elektrischen Eigenschaften, durch welche die Angabe des Instrumentes erst den gewünschten Sinn erhält, während in dem vorigen Abschnitte: „Die Meßinstrumente", S. 1 ff. jedes der besprochenen Instrumente die betreffende Meßmethode involvierte.

Die Methoden der Strommessung.

Die Strommessung bildet, wie wir in dem Abschnitte über Strommesser ausführlich erörtert haben, das zuerst und am eingehendsten angebaute Gebiet der elektrischen Messungen; dasselbe wird beherrscht von einer großen Anzahl von Apparaten, welche, mit der Lehre vom elektrischen Strome und den praktischen Erfahrungen fortschreitend, sich den verschiedenen Zwecken angepaßt und konstruktiv verbessert haben.

Von Methoden, welche nicht bloß auf dem Gebrauch eines Strommessers beruhen und hier zu erwähnen wären, fällt höchstens eine in Betracht, nämlich die Strommessung durch Spannungsmessung. Wie man elektrische Spannung messen kann, indem man an den Punkten, deren Spannungsdifferenz zu messen ist, einen Strommesser anlegt und den gemessenen Strom, in Ampere, mit dem Widerstande des Strommessers multipliziert, so kann man auch einen Strom durch Spannungsmessung bestimmen, indem man einen bekannten Widerstand in den Stromkreis einschaltet, an den Enden desselben die Spannung, in Volt, mißt, und durch jenen Widerstand, in Ohm, dividiert.

Einen Apparat, welcher zu dieser Messungsart dient, erwähnen wir am Ende des Abschnittes über „die Methoden der Spannungsmessung“, S. 150.

Die Methoden der Spannungsmessung.

Bei Gelegenheit der Meßinstrumente für Strom und Spannung hatten wir bereits Methoden der Spannungsmessung anzuführen; wir wollen im folgenden dieselben im Zusammenhange rekapitulieren und das Fehlende hinzufügen.

Die natürlichste Art der Spannungsmessung ist diejenige durch Meßinstrumente, deren Prinzip auf einer Wirkung der elektrischen Spannung beruht. Es gehören hierher namentlich das Thomsonsche Quadrantenelektrometer und die aus demselben hervorgegangenen Typen. Diese Instrumente, welche für alle in Betracht kommenden Meßbereiche konstruiert werden, zeichnen sich dadurch aus, daß sie weder elektrischen Strom noch elektrische Energie verbrauchen, was zwar in vielen Fällen, namentlich bei technischen Messungen, kein ausschlaggebender Vorteil ist, aber doch in einigen Fällen wichtig sein kann.

Die Entwickelung dieser Instrumente haben wir bei Besprechung der Spannungsmesser angedeutet.

Spannungsmessung durch Strommessung. Diejenige Art der Spannungsmessung, welche heutzutage in Wissenschaft und Technik am meisten angewendet wird, ist diejenige durch Strommessung.

Wenn ein Strommesser von bekanntem Widerstande in Ampere geeicht ist, so kann für jeden Strom seines Meßbereiches die an den Enden seiner Wickelung herrschende Spannung berechnet werden, indem man den betreffenden Strom, in Ampere, mit dem Widerstande, in Ohm, multipliziert; man kann also die Stromskala durch eine Spannungsskala ersetzen und hat dann einen Spannungsmesser.

Diese doppelte Benutzung der Strommesser begann, als man anfing, bei elektrischen Gleichstrommaschinen außer dem Strome

auch die Spannung mit demselben Instrument zu messen, dem S. 40 ff. beschriebenen Torsionsgalvanometer. Es kam dann in allgemeine Übung, daß derselbe Instrumenttyp für Messung des Stromes und der Spannung benutzt wurde, jedoch mit verschiedenen Wickelungen, je nach dem Zweck und dem Bereich der Messung. Die Art der Skala, ob proportional oder sich erweiternd oder verengernd, bleibt dann stets dieselbe; ebenso sind alle Vor- oder Nachteile des Instrumenttyps für beide Benutzungen dieselben.

Die ersten Spannungsmessungen im Gebiete des elektrischen Stromes bezogen sich auf die elektromotorische Kraft galvanischer Elemente und begannen bald, nachdem Ohm sein Gesetz aufgestellt hatte. In diesen Zeiten, als man noch kaum wußte, daß die elektromotorische Kraft eines galvanischen Elementes abhängig sei von der durch das Element gehenden Stromstärke und den chemischen Vorgängen im Element, betrachtete man die E. M. K. (elektromotorische Kraft) als eine Konstante, welche man bestimmen könne, wenn man die Widerstände im Stromkreis oder die Schaltung der zu vergleichenden Elemente änderte. Dahin sind folgende Methoden zu rechnen.

Fechner [1]) schaltete dasselbe Galvanometer nacheinander in den Schließungskreis der zu vergleichenden Elemente; die beobachteten Stromstärken verhielten sich alsdann, wenn der Widerstand der Elemente unter sich oder im Verhältnis zum Galvanometerwiderstand klein und der Widerstand des Schließungskreises stets derselbe war, wie die elektromotorischen Kräfte.

Oder er schaltete die beiden Elemente in denselben Schließungskreis, erst hintereinander, so daß ihre E. M. K. sich addierten, dann gegeneinander, und maß die Stromstärken; die E. M. K. ließen sich alsdann nach dem Ohmschen Gesetz berechnen.

Oder er schaltete nacheinander die Elemente zu einem Rheostaten, und brachte jedesmal durch Einstellen des letzteren den Strom auf denselben Wert; die eingeschalteten Widerstände verhielten sich alsdann wie die E. M. K.

Ohm [2]) schaltete verschiedene Widerstände in den Stromkreis desselben Elementes und maß die Stromstärken; die E. M. K.

---

[1]) Pogg. Ann. 45, 232, 1838.
[2]) Schweigg. Journ. 58, 416 (1830).

ließ sich alsdann aus den Widerständen und den Stromstärken berechnen. Hierbei konnten für diese Größen beliebige Maßeinheiten gewählt werden; die Maßeinheit der E. M. K. war dann das Produkt der Einheiten für Strom und für Widerstand.

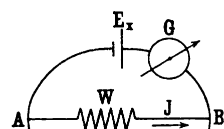
Wheatstone[1]) regulierte den Widerstand des Stromkreises des Elementes so, daß an der Tangentenbussole nacheinander zwei bestimmte Ablenkungen auftraten; die E. M. K. verschiedener Elemente verhielten sich dann wie die zugeschalteten Drahtlängen.

Regnault[2]) fing an, die E. M. K. ohne Strom zu untersuchen, indem er das zu untersuchende galvanische Element und eine Thermosäule gegeneinander schaltete und so viele Elemente der letzteren wählte, daß sich beide Säulen aufhoben und der Strom Null war.

Denselben Zweck, aber in geeigneterer Weise, verfolgte Poggendorff[3]) in seiner Kompensationsmethode, welche sich bis auf die Jetztzeit erhalten hat, und in modifizierter Gestalt die Grundlage beinahe aller späteren hierher gehörenden Methoden gebildet hat.

Er vergleicht die zu bestimmende E. M. K. E_x, auch von inkonstanten Elementen, mit derjenigen (E_1) eines konstanten Daniellschen oder Groveschen Elementes (s. Fig. 100) und schaltet beide Elemente gegeneinander in denselben Stromkreis.

Fig. 100.



Zu dem unbekannten Elemente E_x wird ein Galvanoskop G und zwischen die Punkte A, B der Rheostat W geschaltet. Der Rheostat wird so reguliert, daß das Galvanoskop keinen Strom anzeigt, das unbekannte Element also ohne Strom ist. Ist w der am Rheostat eingeschaltete Widerstand, w_1 derjenige des das Normalelement E_1 enthaltenden Zweiges incl. den Widerstand des letzteren, so ist die unbekannte E. M. K.:

$$E_x = E_1 \frac{w}{w + w_1}.$$

[1]) Phil. Trans. **2**, 313 (1843).
[2]) Ann. de Chim. et de Phys. **44**, 453 (1854).
[3]) Pogg. Ann. **54**, 151 (1841).

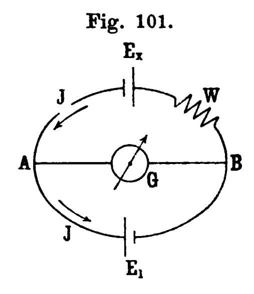
Bei dieser Methode konnte auch die zu bestimmende E. M. K. durch den Strom J, der durch das Element E und den Rheostat W fließt, und der z. B. an einer Tangentenbussole gemessen werden konnte, und der Widerstand w ausgedrückt werden; denn es ist einfach

$$E_x = Jw.$$

Diese Art der Bestimmung empfahl sich namentlich, wenn das Element E_1 nicht ganz konstant war und seine E. M. K. sich veränderte.

Bosscha[1]) modifizierte die Poggendorffsche Methode dahin, daß das zu messende Element nicht stromlos war, sondern von demselben Strom durchflossen wurde, wie das Normalelement. Er schaltete nämlich (s. Fig. 101) das unbekannte Element E_x nicht gegen das normale E_1, sondern in demselben Sinne, vertauschte den Rheostat W mit dem Galvanoskop G und stellte auf den Strom Null im Zweige AB ein. Wenn w_1 der Widerstand des Zweiges, welcher das Element E_1 enthält, w derjenige des E_x enthaltenden Zweiges, so ist bei dieser Einstellung

Fig. 101.



$$E_x = E_1 \frac{w}{w_1}.$$

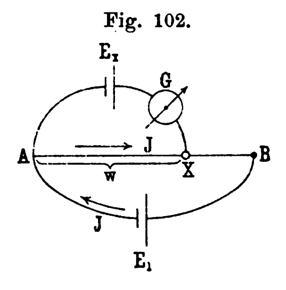
1862 modifizierte nun du Bois-Reymond[2]) die Poggendorffsche Methode dadurch, daß er nicht den Rheostaten regulierte, also verschiedene Widerstände einschaltete, sondern Widerstand und Stromstärke in dem Normalelemente E konstant ließ und die Anlegestelle des das unbekannte Element E_x enthaltenden Zweiges verschob. Der Stromkreis des Elementes E_1 wurde dann, abgesehen von Kupferzuleitungen, durch einen geradlinig längs einer Teilung ausgespannten dünnen Neusilber- oder Platindraht AB (s. Fig. 102) gebildet; an den Anfang A desselben war der Zweig des unbekannten Elementes gelegt, während das Ende X des letzteren, ähnlich wie bei dem Meßdraht der Wheatstoneschen Brücke, in Form eines Laufkontaktes längs dem

---

[1]) Pogg. Ann. 94, 172 (1855).
[2]) Abhandl. d. Berl. Akad. 1862, S. 707.

Meßdraht so lange verschoben wurde, bis das Galvanoskop G auf Null zeigte. Wie sich die unbekannte E. M. K. E_x zu derjenigen des Elementes E_1 verhielt, konnte hierbei zweifelhaft sein, wenn dasselbe sich allmählich veränderte; aber sicher verhielten sich die E. M. K. mehrerer rasch nacheinander der Messung unterworfener unbekannter Elemente (ohne Strom) wie die am Meßdrahte gefundenen Längen.

Fig. 102.



Diese Form der Kompensationsmethode wurde lange Zeit mit Erfolg zu der Bestimmung der E. M. K. benutzt und auch bei viel angewendeten Instrumenten, wie z. B. dem Siemensschen Universalgalvanometer, eingeführt; als Normalelement diente meist das Daniellsche Element; da dessen E. M. K. indessen den Ansprüchen höherer Genauigkeit nicht genügte, konnten diese Bestimmungen auch eine solche nicht beanspruchen.

Spannungsmessung mittels Normalelementen. Nach der Einführung des absoluten Maßsystems und des Volt als praktischer Spannungseinheit wurde jedoch von Spannungsmessungen größere Genauigkeit verlangt, und konnte auch leicht erreicht werden, da das Volt gleich dem Produkt Ampere $\times$ Ohm ist, und diese Maßeinheiten mit aller Sicherheit sich bestimmen ließen.

Es trat aber auch das Bedürfnis hervor, galvanische Elemente zu besitzen, deren E. M. K. im stromlosen Zustande genau in Volt gegeben ist, wenn die Vorschriften für die Herstellung derselben genau befolgt werden. Es gelang auch, solche Elemente zu konstruieren und sogar die Abhängigkeit ihrer E. M. K. von der Temperatur mit Sicherheit festzustellen. Wir besitzen heute als solche Normalelemente das Clarksche und das Cadmiumelement.

Nachdem auf diese Weise sichere Fixpunkte für die Spannungsmessung gegeben waren, bestrebte man sich auch, Anordnungen von Meßinstrumenten zu schaffen, mittels deren sich alle vorkommenden Spannnngen in Volt messen ließen, und so die Möglichkeit zu geben, die technischen Gleichstrommessungen (Stromstärke, Spannung, Energie), die bisher auf Strommessungen beruhten, ganz auf Spannungsmessungen aufzubauen.

Die Poggendorff-du Boissche Methode konnte auch hierfür verwendet werden, aber in anderem Sinne als bisher. Während früher das in dem stromlosen Zweige eingeschaltete Element das unbekannte war, mußte jetzt eines der neuen Normalelemente von bekannter E. M. K. in den stromlosen Zweig gelegt werden, weil diese Elemente nur stromlos oder beinahe stromlos gebraucht werden dürfen. Das stromgebende, früher als „normal" betrachtete Element wurde zum Hilfselement, und der den äußeren Kreis desselben bildende Widerstand wurde so gewählt, daß die Stromstärke einen bestimmten dekadischen Wert erhielt; wenn dies der Fall war, so hatte auch die an den Enden irgend eines Teiles dieses Stromkreises herrschende Spannungsdifferenz dieselbe Zahl, abgesehen vom Komma, in Volt, welche den Widerstand dieses Teiles, in Ohm, bezeichnet; der äußere Kreis des Hilfselementes bildete also, wenn er gleichsam als ein in Ohm geteilter Maßstab ausgespannt war, zugleich einen Maßstab in denselben Zahlen, für Spannungen in Volt, der zu den Spannungsmessungen dienen konnte.

Ist z. B. die Stromstärke im Kreise des Hilfselementes genau 0,01 Amp., so ist die an den Enden von 1 Ohm in diesem Kreise herrschende Spannung 0,01 Volt, an den Enden von 143,4 Ohm : 1,434 Volt; und wenn nun an den Enden des letzteren Widerstandes ein Clarksches Normalelement, das bei 15° C diese E. M. K. in Volt besitzt, angelegt wird, so zeigt ein vor dieses Element geschaltetes Galvanometer auf Null; und wenn nun Drähte, die nach zwei Punkten irgend eines Stromkreises führen, so angelegt werden, daß der Galvanometerstrom Null wird, und der Widerstand zwischen den Anlegestellen z. B. 563,7 Ohm beträgt, so ist die Spannungsdifferenz an jenen Punkten 5,637 Volt.

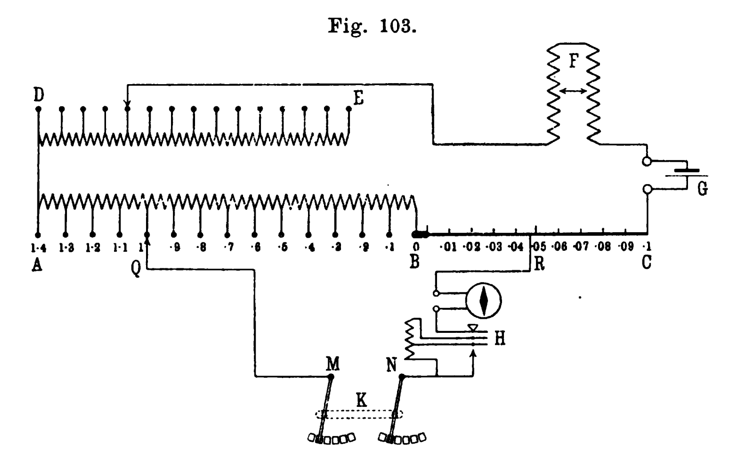
Fig. 103 zeigt schematisch die Anordnung des Potentiometers von Crompton, dessen Gedanke von Fleming herrührt. Das Hilfselement *G* ist durch die Regulierwiderstände *D*, *E* und *F* und durch einen Präzisionswiderstand *ABC* geschlossen. Bei dem letzteren ist als Einheit z. B. 100 Ohm gewählt; dann hat jede der Rollen zwischen *A* und *B* einen Widerstand von $^1/_{10}$ dieser Einheit oder 10 Ohm; zwischen *BC* ist ein kalibrierter Draht mit Teilung in Hundertstel ausgespannt, jedes Hundertstel hat $^1/_{100}$ der obigen Einheit oder 1 Ohm Widerstand;

zwischen den Gleitkontakten *QR* liegt also, in der Figur, ein Widerstand von 1,046 obiger Einheit.

Der in *Q* und *R* angelegte Zweig enthält das in *MN* einzuschaltende Element, den Schlüssel *H*, durch welchen die links davon angedeuteten Widerstände nacheinander kurzgeschaltet werden können, zur sukzessiven Vergrößerung der Empfindlichkeit, und das darüber angedeutete Galvanometer.

Zunächst wird in *MN* ein Clarksches Element angelegt, dessen Temperatur z. B. 15° C sei; bei dieser Temperatur ist seine E. M. K. 1,4340 Volt. *Q* und *R* werden so angelegt, daß dazwischen ein Präzisionswiderstand 1,4340 der obigen Einheit

Fig. 103.



liegt; dann werden die Regulierwiderstände so lange verstellt, bis das Galvanometer Null zeigt. Dann ist die Skala in Volt richtig.

Wird nun an *MN* das zu messende Element angelegt und die Kontakte *QR* so lange verschoben, bis das Galvanometer wieder Null zeigt, und liegen, wie in der Figur, zwischen *Q* und *R* 1,046 Teilstriche, so ist die gesuchte E. M. K. 1,046 Volt.

Auf diese Weise können nun auch Stromstärken und elektrische Energien gemessen werden, indem man deren Messung auf Spannungsmessungen reduziert.

Soll die Stromstärke in irgend einem Stromkreise gemessen werden, so wird ein passender dekadischer Widerstand in denselben eingeschaltet und die Spannung an den Enden desselben

gemessen; das Verhältnis der letzteren zu jenem dekadischen Widerstande ist die Stromstärke. Ist eine elektrische Energie zwischen zwei Punkten eines Gleichstromkreises zu messen, so werden mit diesem Instrumente Spannungsdifferenz und Stromstärke gemessen und das Produkt gebildet.

Dieses Instrument leistet dasselbe durch Spannungsmessungen in Gleichstromkreisen, was das S. 40 ff. beschriebene Torsionsgalvanometer durch Strommessungen; wie bei diesem beruht die Messung auf einer Einstellung. Die Entfernung des Instrumentes von dem zu messenden Stromkreise kann groß gewählt werden, weil nach Einstellung des Gleichgewichtes kein Strom in den Zuleitungen herrscht, deren Widerstand also nicht in Betracht kommt.

Alles Vorstehende in diesem Abschnitt bezieht sich auf Gleichstrom.

Transformation der Spannung. Zu Spannungsmessungen in Wechselstromkreisen benutzt man, wie bereits früher erwähnt, Elektrodynamometer oder statische Spannungsmesser. Bei Hochspannungsanlagen wäre die Anwendung dieser Instrumente oft unmöglich oder mindestens lebensgefährlich. In diesen Fällen bildet die einzige Möglichkeit der Messung die Transformierung des Hochspannungsstromes auf niedrige, meßbare Spannung, d. h. man schaltet in den Hochspannungskreis die primäre Spule eines Meßtransformators, in die sekundäre, viel weniger Windungen als die primäre besitzende Spule das Niederspannungsmeßinstrument. Dann ist die Gefahr für den Messenden beseitigt und die Messung erfolgt wie bei Niederspannung.

Die Methoden der Widerstandsmessung.

Nachdem Ohm in seinem Gesetze das elektrische Leitungsvermögen und die Größe, welche wir heute Widerstand nennen, in die Elektrizität eingeführt hatte, begannen auch Bestimmungen

dieser beiden Größen. Daß dieselben nur geringe Genauigkeit besitzen konnten, ist klar; denn es gab damals weder ein brauchbares Widerstandsmaß noch Widerstandsskalen, vor dem Weberschen Spiegelgalvanometer und der Pouilletschen Tangentenbussole keinen sicheren Strommesser, und für die Bestimmung der elektromotorischen Kraft weder Methoden noch Apparate.

Erste Methoden. Man half sich zunächst auf die einfachste Weise dadurch, daß man in einem eine Batterie und ein Galvanometer enthaltenden Stromkreise erst das willkürlich angenommene Widerstandsmaß einschaltete und die Ablenkung beobachtete, dann den unbekannten Widerstand einschaltete und die Dimensionen desselben, namentlich bei Drähten die Länge, so lange veränderte, bis wieder dieselbe Ablenkung erfolgte.

Als Differentialgalvanometer und Rheostaten bekannt wurden, verzweigte man auch den Strom, entsprechend den beiden Wickelungen des Galvanometers, in zwei Teile, schaltete in den einen Zweig den Rheostaten, in den anderen den unbekannten Widerstand und veränderte den Rheostaten so lange, bis das Galvanometer keine Ablenkung zeigte.

Man wendete auch zwei getrennte Stromkreise an, jeden mit einer Wickelung des Differentialgalvanometers und einer Batterie, und machte die Batterien einander möglichst gleich, z. B. durch Anwendung von gleichen und gleichmäßig erwärmten Thermoelementen.

Methoden von W. Weber. Später arbeitete W. Weber mit einer Genauigkeit, welche noch heute kaum übertroffen ist, an seinen elektrodynamischen Maßbestimmungen mit Hilfe seiner exakten Strommesser, dem Spiegelgalvanometer und dem Spiegelelektrodynamometer; da bei diesen Arbeiten ihm überall das Bedürfnis genauer Widerstandsbestimmungen entgegentrat, löste er auch diese Aufgabe und gab zum ersten Male sichere und genaue Widerstandsbestimmungen.

Als Widerstandsmaß benutzte er zunächst den von Jacobi verbreiteten Kupferdrahtetalon, bestätigte die Bedenken, welche bereits Jacobi in betreff der Zuverlässigkeit dieses Maßes geäußert hatte, und wandte sich dann sofort nach der absoluten elektromagnetischen Maßeinheit, deren Definition durch seine früheren Arbeiten vorbereitet war, und stellte damit seine Widerstandsbestimmungen auf eine unverrückbare Grundlage.

Als Stromquelle verwandte er nicht Batterien und konstante Ströme, sondern momentane, induzierte Stromstöße, welche durch Bewegung einer Drahtwickelung durch den Erdmagnetismus oder einen Magnet in derselben erzeugt wurden. Dies stand einerseits in Beziehung zu den von ihm verwandten Galvanometern mit langen Nadeln, bei denen die Beobachtung mehr auf die Ausschläge, als auf die Ablenkungen angewiesen war; andererseits entstand der Vorteil, daß die elektromotorischen Kräfte sich in absolutem Maße berechnen ließen, wenn die wirkende Komponente des Erdmagnetismus oder das magnetische Moment des Magnets in absolutem Maße bekannt waren.

Als Beispiele seiner Methoden der Widerstandsbestimmungen erwähnen wir folgende.

Der Stromstoß, welcher durch Schieben einer Drahtrolle über einen Magnet oder deren Entfernung entstand, wurde durch ein Spiegelgalvanometer und einen unbekannten Widerstand geschickt und durch Anwendung der S. 14 beschriebenen Multiplikationsmethode, durch Stromstöße beim Durchgang durch die Nullage, bis zu konstanten Werten der Ausschläge gesteigert. Dasselbe geschah bei Einschaltung anderer Widerstände in verschiedenen Kombinationen; da die elektromotorischen Kräfte stets gleich, wenn auch unbekannt, und die Ausschläge proportional den durch das Galvanometer gehenden Strömen waren, so ließen sich aus den Ausschlägen die Verhältnisse sämtlicher Widerstände zu einem Grundmaße, z. B. dem Jacobischen Draht, berechnen.

Um einen Widerstand in absolutem Maße zu bestimmen, wurde unter anderem ein Erdinduktor, d. h. eine Drahtwickelung von bekannten Dimensionen, z. B. um eine horizontale Achse gedreht, und der durch den Erdmagnetismus erzeugte Stromstoß durch ein Spiegelgalvanometer mit verhältnismäßig kleinem Magnet und kreisförmigen Windungen, also mehr eine Tangentenbussole mit Spiegelablesung, geschickt und nach der Zurückwerfungsmethode beobachtet. Gemessen wurden: der dem Stromstoße entsprechende Ausschlag, die Schwingungsdauer der Galvanometernadel, die Torsion des Aufhängefadens, die erdmagnetischen Kräfte für den Ort des Erdinduktors und denjenigen der Nadel und die in Betracht kommenden Dimensionen; dann konnte der Widerstand des Stromkreises in absolutem Maße berechnet werden.

Zu einer anderen, ebenfalls absoluten Widerstandsbestimmung wurde ebenfalls ein Spiegelgalvanometer mit kreisförmigen Windungen, aber mit besonders kräftigem Magnet verwendet, und die Abnahme der Schwingungen desselben bei geschlossener Wickelung, also unter Verwendung des Multiplikators als Dämpfer, beobachtet; die Abnahme der Schwingungen mußte auch bei offenem Stromkreise beobachtet werden. Aus diesen Beobachtungen ergaben sich die den beiden Fällen entsprechenden logarithmischen Dekremente; außerdem waren zu messen: die Schwingungsdauer der Galvanometernadel, der Einfluß der Torsion des Fadens und durch Ablenkungsversuche die Größe des Nadelmagnetismus im Verhältnis zum Erdmagnetismus. Dann ließ sich der Widerstand des Multiplikators ebenfalls in absolutem Maße berechnen.

Die größte Differenz zwischen Bestimmungen desselben Drahtes nach den beschriebenen, voneinander ganz verschiedenen Methoden, betrug wenige Tausendstel des Wertes.

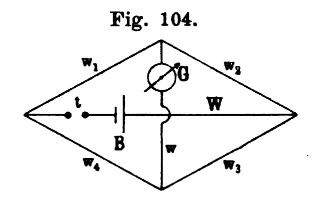
Der moderne Elektriker, der gewohnt ist, in wenigen Minuten einen Widerstand in absolutem Maße und mit großer Genauigkeit zu messen, ist geneigt, den Fortschritt der modernen Widerstandsmessung gegenüber den Weberschen zu überschätzen. Dies ist jedoch keineswegs gerechtfertigt. Einerseits ist dieser Fortschritt viel geringer als der Unterschied zwischen den Messungen von W. Weber und denjenigen seiner Vorgänger; andererseits nimmt die Webersche Widerstandsmessung mittels der Grenzausschläge des Spiegelgalvanometers nach der Multiplikationsmethode kaum mehr Zeit in Anspruch als die heute allgemein angewendete Brückenmessung. Die nötige Schulung des Beobachters dürfte in beiden Fällen gleich groß sein. Endlich ist nicht zu vergessen, daß Weber keine Widerstandsskalen hatte und seine Widerstände selbst in absolutem Maße bestimmte, während wir über sehr genaue Widerstandsskalen verfügen und die absolute Bestimmung offiziellen Instituten überlassen, welche für solche Zwecke aufs beste eingerichtet sind.

Wheatstonesche Brücke. Die wichtigste Erscheinung im Bereiche der Widerstandsmessung, welche alle früheren Methoden verdrängte, ist die Wheatstonesche Brücke[1]), anfangs auch das Wheatstonesche Drahtviereck genannt. Es ist dies die

[1]) Wheatstone, Phil. Trans. 2, 323, 1843; Pogg. Ann. 62, 535.

erste **Nullmethode**, d. h. eine Methode, welche auf der Einstellung des Stromes Null im Galvanometer beruht, bei welcher also das Messen von Ausschlägen oder Ablenkungen vermieden wird.

Fig. 104.



Dieselbe benutzt eine im Vierecke angeordnete Kombination von Drähten oder Widerständen, dessen einander gegenüberliegende Ecken ebenfalls durch Widerstände verbunden sind; man hat also zwischen Seitenzweigen (w_1, w_2, w_3, w_4) und Diagonalzweigen (w_1, W) zu unterscheiden (s. Fig. 104).

Wenn im Diagonalzweige w ein Galvanometer, im Diagonalzweige W eine Batterie eingeschaltet wird, so muß, wenn das Galvanometer keinen Strom anzeigt, unter den Widerständen der Seitenzweige die Proportion erfüllt sein:

$$w_1 w_3 = w_2 w_4;$$

wenn also z. B. w_1 unbekannt, dagegen w_2, w_3, w_4 bekannt sind, so ist

$$w_1 = \frac{w_2 w_4}{w_3},$$

also w_1 aus den übrigen Widerständen berechenbar.

Daß die beiden Diagonalzweige miteinander vertauscht werden dürfen, d. h. daß in w die Batterie, in W das Galvanometer oder umgekehrt eingeschaltet werden konnte, zeigte Svanberg[1]).

Wenn große Genauigkeit nicht verlangt wird, läßt sich diese Methode in der in Fig. 105 angegebenen Weise anordnen. ce ist ein ausgespannter Meßdraht (w_1, w_2) mit Skala von z. B. 1 m in Millimeter geteilt, s ein Gleitkontakt, G das Galvanometer, A das galvanische Element, a (w_4) und n (w_3) die zu vergleichenden Widerstände. Der Gleitkontakt wird solange verschoben, bis das Galvanometer keine Ablenkung anzeigt; dann ist das Verhältnis $\frac{a}{n}$ gleich demjenigen der Längen $\frac{cs}{es}$.

Man konnte also nicht nur gleiche Widerstände, sondern beliebig verschiedene (w_4, w_3) miteinander vergleichen; denn für die

---

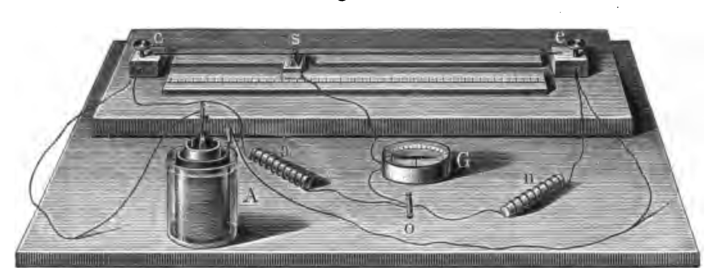
[1]) Pogg. Ann. **84**, 411, 1857.

Drähte w_1, w_2 war zwar die Summe konstant, aber das Verhältnis $\frac{w_1}{w_2}$, welches dem Verhältnis $\frac{w_4}{w_3}$ gleich war, beliebig einstellbar. Man konnte also, von einem bekannten Widerstandsetalon aus, beliebige Vielfache und Unterabteilungen desselben herstellen, und im Prinzip wenigstens jeden beliebigen Widerstand messen.

Diese Form der Wheatstoneschen Brücke hat sich bis heute erhalten, ist aber jetzt meist durch eine Kombination von Widerstandsskalen ersetzt; welche größere Sicherheit und Genauigkeit gewährt.

Nachdem die Siemensschen Widerstandsskalen in allgemeinen Gebrauch gekommen waren, fanden sie auch sofort Verwendung für die Wheatstonesche Brücke; und zwar wurde als

Fig. 105.



bekannnter Widerstand (w_3 oder w_4), mit dem der unbekannte zu vergleichen war, eine Stöpselwiderstandsskala, z. B. von 1 bis 10 000 Siemensschen Widerstandseinheiten, eingeschaltet, und statt der bisher aus einem ausgespannten Draht bestehenden Seitenzweige w_1, w_2 ebenfalls eine Widerstandsskala, welche jedoch für jeden dieser Zweige nur dekadische Werte, z. B. 1, 10, 100, 1000 S.-E. einzuschalten gestattete. Das Verhältnis der Brückenzweige (w_1, w_2), oder auch des unbekannten und des bekannten Widerstandes, konnte also nicht mehr beinahe beliebig, wie bei dem ausgespannten Drahte, sondern nur in dekadischen Verhältnissen 1 : 1, 1 : 10, 1 : 100, 10 : 1 usw. gewählt werden, aber man erlangte hierdurch auch den Vorteil, daß nach erfolgter Einstellung die an dem Widerstandskasten eingeschaltete Zahl von Siemenseinheiten, heutzutage von Ohm, zugleich auch die Zahl der Wider-

standseinheiten des unbekannten Widerstandes bedeutet und man nur das Komma, je nach dem Werte der Brückenzweige, zu setzen hatte.

Formen der Meßbrücke. In den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts, in welchen die Firma Siemens u. Halske (Berlin) allein Widerstandsskalen und Meßbrücken konstruierte und ausgab, bildeten sich bei derselben zwei Formen der Meßbrücke aus, nämlich das Universalgalvanometer von W. Siemens und der Universalwiderstandskasten von Siemens u. Halske.

Das erstere Instrument hatte kompendiöse Form, enthielt, außer einem Meßdraht zur Herstellung zweier variabler Zweige und einigen dekadischen Widerstandsrollen als dritten Zweig, ein Galvanometer und genügte für die meisten damals vorkommenden, praktischen Zwecke und eine mittlere Genauigkeit. Das letztere enthielt weder Galvanometer noch Meßdraht, sondern statt des letzteren zwei Reihen von dekadischen Widerstandsrollen, und als dritten Zweig eine ganze Widerstandsskala; dasselbe, in Verbindung mit einem Spiegelgalvanometer, diente für genauere, mehr wissenschaftliche Messungen, und die Herstellung von Widerstandsetalons auf Grundlage der Siemensschen Widerstandseinheit. Durch diese Instrumente war also das ganze Gebiet der Widerstandsmessung gedeckt, mit Ausnahme der Normalbestimmung der Kopien der Einheit, und der mehr später auftretenden sehr kleinen und sehr großen Widerstände.

Das Universalgalvanometer von W. Siemens zeigt Fig. 106.

Es besteht aus einem runden, mit Stellschrauben versehenen Grundbrett, darüber eine runde Schieferplatte, an deren Rand der Meßdraht ausgespannt und auf deren Mitte das Galvanometer aufgebaut ist; die dekadischen Widerstandsrollen des dritten Brückenzweiges, welche durch Stöpselung eingeschaltet werden, und der Taster befinden sich vorn, wo sich der Beobachter aufstellt. Diese Anordnung nimmt weniger Raum ein, ist in der Handhabung viel bequemer und gestattet eher größere Genauigkeit, als die ursprüngliche Form der Wheatstoneschen Brücke, und ist außerdem leicht transportabel; es war die erste vom Standpunkte des messenden Praktikers und ausführenden Mechanikers durchdachte Konstruktion der Meßbrücke.

Längs des Meßdrahtes erstreckt sich eine in die Schieferplatte eingeritzte Teilung. Das Verhältnis der beiden Zweige, in welche der Kontakt den Meßdraht teilt, wurde an einer Tabelle abgelesen; man hatte nach erfolgter Einstellung den durch Stöpselziehen eingeschalteten Widerstand (10, 100, 1000) mit diesem

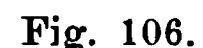
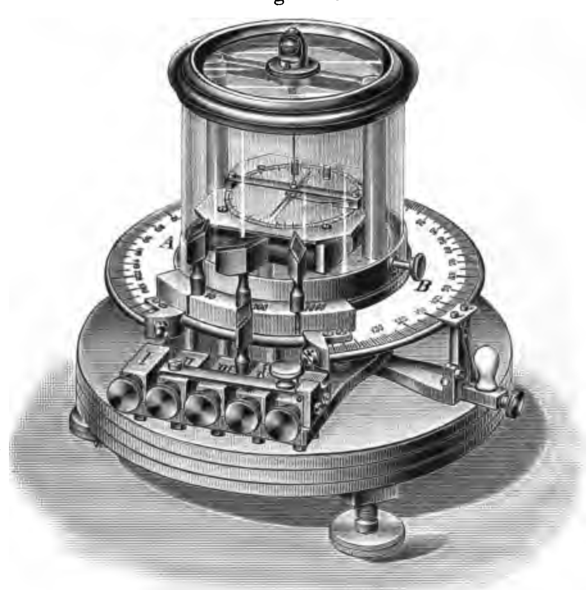


Fig. 106.



Verhältnis zu multiplizieren, d. h. an dem letzteren das Komma richtig zu setzen.

Die kreisförmige Anordnung des Brückendrahtes ist nicht nur kompendiöser als die geradlinige, sondern auch zweckentsprechender. Während bei der letzteren der verschiebbare Kontakt, wenn in Form einer Schneide, den Meßdraht beschädigt, oder, wenn in Form eines Quecksilbernäpfchens, keine genaue Ortsbestimmung gestattet, läßt sich bei der kreisförmigen Anordnung ein an einem drehbaren Arm sitzendes, kleines Platinröllchen als Kontakt benutzen, welches den Meßdraht nicht beschädigt und doch genaue Ortsbestimmung zuläßt; auch ist die Einstellung im letzteren Falle feiner.

Das Galvanometer mit direkter Ablesung war ein Nobilisches, mit astatischer, an Kokonfaden aufgehängter Nadel. Die Empfindlichkeit desselben genügte bei geringer Batterie; die Beobachtung der Schwingungen indessen war umständlicher als bei den neueren Instrumenten derselben Empfindlichkeit.

Mit dem Universalgalvanometer ließen sich, außer der Brückenmessung, auch andere Messungen ausführen, namentlich der elektromotorischen Kraft von Elementen oder Batterien nach der Kompensationsmethode.

Den Universal-Widerstandskasten von Siemens u. Halske stellt Fig. 107 dar; derselbe besteht aus der Kombi-

Fig. 107.



nation einer Widerstandsskala mit zwei Sätzen von dekadischen Widerständen.

Diese Anordnung gestattet höhere Genauigkeit der Messung als das Universalgalvanometer, weil die Ungenauigkeiten des Querschnittes des Meßdrahtes fortfallen und weil bei größeren Widerständen die Vorschrift, daß die Widerstände der Brückenzweige möglichst ähnlich dem unbekannten Widerstand zu wählen sind, sich besser erfüllen läßt.

Außerdem fällt das Ablesen des Widerstandsverhältnisses der beiden Teile des Meßdrahtes aus der Tabelle weg; nach erfolgter Einstellung wird der an der Widerstandsskala eingeschaltete Widerstand abgelesen und das Komma nach dem Wert der dekadischen Widerstände in den festen Brückenzweigen ein-

gesetzt. Man hat also den gesuchten Widerstand „greifbar“ vor sich.

Die Entwickelung der Meßbrückenkonstruktionen in der neueren Zeit bietet wenig hervorragende Momente.

Der Meßdraht verlor sich mehr und mehr; es wird heutzutage beinahe nur noch „dekadisch“ gemessen, wie bei dem eben beschriebenen Universal-Widerstandskasten.

Meßbrücken für den wandernden Elektrotechniker, den Monteur, wurden in noch kompendiöserer Form konstruiert, mit schnell arbeitenden Galvanometern und mit Trockenelementen oder kleinen Magnetmaschinen als Batterie.

Nach 1881 wurde bald allgemein die Justierung in Ohm eingeführt, was jedoch keine Änderungen in den Konstruktionen notwendig machte.

Heutzutage ist das Meßwesen der metallischen elektrischen Widerstände ähnlich eingerichtet, wie dasjenige der Längen in Metern und der Gewichte in Gramm. Offizielle Institute sorgen für die Genauigkeit der Urmaße und der Gebrauchsmaße, und der Gelehrte sowohl, als der Techniker, wählen aus der Menge der käuflichen Konstruktionen diejenigen Meßmittel aus, deren sie bedürfen.

Diese Wheatstoneschen Brücken eignen sich in ausgezeichneter Weise für den mittleren Bereich der Widerstände, etwa von 0,1 Ω bis 100 000 Ω (Ω = Ohm), nicht aber für sehr kleine bis herab zu etwa $^1/_{1\,000\,000}$ Ω, und für sehr große Widerstände, bis hinauf zu 1 Billion Ω oder 1 Million Megohm. Für sehr kleine Widerstände machen sich die Übergangswiderstände zwischen den verschiedenen Metallstücken zu sehr geltend; da die Wheatstonesche Brücke von denselben abhängig ist, wird das Resultat um so ungenauer, je kleiner der Widerstand ist.

Für sehr große Widerstände wird die Empfindlichkeit der Galvanometer auch bei den feinsten Spiegelgalvanometern hinderlich; denn bei der Wheatstoneschen Brücke sind die durch das Galvanometer gehenden Ströme nur ein Teil der von der Batterie ausgehenden Ströme; die Messung von hohen Widerständen mit der Brücke findet daher, auch bei Anwendung starker Batterien, eine Grenze, bei welcher die Einstellung des Gleichgewichtes nicht mehr mit genügender Schärfe erfolgen

kann und welche von der Empfindlichkeit des Galvanometers abhängt.

Die feinsten Widerstandsmessungen kommen zur Verwendung bei der Messung und Justierung von Widerstandsnormalen, aber auch bei elektrischen Temperaturbestimmungen, die bereits S. 112 erwähnt wurden.

Temperaturmessung mittels Meßbrücke; Bolometer. Das Bolometer, welches zu den genauesten Messungen der strahlenden Wärme dient, besteht aus einem Streifen von dünnstem, berußtem Kupferblech, welches die eingestrahlte Wärme schnell absorbiert und bei der Abkühlung wieder schnell abgibt. Dasselbe wird zusammen mit drei konstanten Widerständen zu einer Meßbrücke vereinigt; als Galvanometer dient ein Spiegelgalvanometer von höchster Empfindlichkeit und ähnlichem Widerstand, also dickem Draht. Man stellt das Gleichgewicht her bei geschlossener Einstrahlungsöffnung; man läßt alsdann die Wärmestrahlung einige Sekunden auf das Instrument wirken und mißt den am Galvanometer auftretenden ersten ballistischen Ausschlag; dann läßt man bei geschlossener Öffnung die Abkühlung eintreten.

Temperaturen an entfernten Stellen, im Inneren der Erde, von Wassermassen, mißt man auch mit Hilfe der Meßbrücke, indem man zwei möglichst gleiche, sorgfältig isolierte Kupferdrahtrollen in die Brücke einschaltet, die eine in ein Gefäß von bekannter Temperatur, die andere an den Ort, dessen Temperatur zu messen ist, bringt, und das Widerstandsverhältnis der beiden Rollen bestimmt, aus welchem sich die Temperaturdifferenz ergibt.

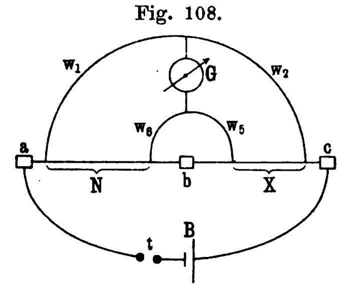
Sehr kleine Widerstände; Thomsonsche Meßbrücke. Für sehr kleine Widerstände dient die Thomsonsche Brücke, welche ebenfalls in einer Nullmethode besteht, deren Prinzip jedoch von demjenigen der Wheatstoneschen Brücke verschieden ist und bei welcher die Abhängigkeit der Messung von den Übergangswiderständen nicht mehr vorhanden ist; mittels derselben lassen sich Millionstel Ohm messen.

Fig. 108 erläutert dieses Prinzip.

Je kleiner der zu messende Widerstand ist, desto ungenauer wird die Messung mit der gewöhnlichen Brücke, weil die Widerstände, die an den Kreuzungspunkten, z. B. bei Klemmschrauben, entstehen, immer mehr in Rechnung fallen und sich doch nicht

bestimmen lassen. Ist bc der zu messende Widerstand, z. B. ein kurzer, starker Kupferdraht, ab ein Draht, z. B. aus dickem Neusilber, von bekanntem Widerstande, so müssen für die Messung stärkere Ströme durch dieselben geschickt werden, um die zur Messung nötigen Spannungsdifferenzen zu erhalten; werden diese beiden Widerstände und die etwas kräftige Batterie B hintereinander geschaltet, so sind die Verbindungsstellen a, b, c die kritischen, mit Übergangswiderständen behafteten Punkte.

Fig. 108.



Um die Messung unabhängig von Übergangswiderständen zu gestalten, legt Thomson die übrigen Brückenzweige außerhalb der Punkte a, b, c an und fügt zu den in der Wheatstoneschen Brücke verwendeten Zweigen w_1, w_2, noch zwei Zweige w_5, w_6, zu, welche zu beiden Seiten von b anliegen; diesen vier Zweigen werden so hohe Widerstände (wenigstens je 10 Ohm) gegeben, daß die Kontaktstellen derselben an N und X, welche in Schneiden oder beweglichen Röllchen bestehen, nur solche Widerstände besitzen, die im Vergleich zu den vier Zweigen außer Rechnung fallen. Das Galvanometer, auf dessen Stromlosigkeit, wie bei der Wheatstoneschen Brücke, eingestellt wird, liegt zwischen den Verbindungsstellen $(w_5 w_6)$ und $(w_1 w_2)$.

Dann herrscht aber beim Strome Null im Galvanometerzweig ein ganz anderes Widerstandsgleichgewicht in der Meßbrücke; die Widerstände des Batteriezweiges B, des Galvanometerzweiges G fallen, wie sonst, außer Rechnung, aber auch derjenige der Anlegestellen um b; zwischen den übrigen Zweigen herrscht die Proportion, daß, wenn die bekannten Zweige w_1, w_2, w_5, w_6 so angeordnet werden, daß

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{w_5}{w_6},$$

dann, im Falle des Gleichgewichtes, d. h. des Stromes Null im Galvanometerzweig G, auch das Verhältnis herrscht:

$$\frac{N}{X} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{w_5}{w_6}.$$

Hier fallen also die Übergangswiderstände in den Punkten a, b, c außer Rechnung.

Man gibt nun den Widerständen w_1, w_2, w_5, w_6 dekadische Werte, z. B. 10, 100, 1000 Ohm; das Verhältnis $w_1/w_2 = w_5/w_6$ ist dann ebenfalls ein dekadischer Wert, und das Verhältnis N/X wird auf denselben Wert gebracht durch Einstellung von N. Hierbei ist zu beachten, daß N und X nicht die ganzen Widerstände ab bzw. bc bedeuten, sondern die zwischen den betreffenden Abzweigestellen liegenden Teile derselben. Dann ist für X:

$$X = N \frac{w_2}{w_1} = N \frac{w_6}{w_5},$$

d. h. der gesuchte Widerstand X gleich dem nach der Einstellung abzulesenden Widerstand N, wobei das Komma nach dem dekadischen Verhältnis $\frac{w_2}{w_1}$ oder $\frac{w_6}{w_5}$ zu setzen ist.

Der Normaldraht wird am besten kreisförmig gebildet, an welchem, wie beim Universalgalvanometer, ein Platinröllchen als Laufkontakt entlang gleitet, während die andere Abzweigstelle am Anfang der Teilung fest angefügt ist; die Teilung gibt Bruchteile des Ohm.

Als Galvanometer dient ein mit dickem Draht bewickeltes Spiegelgalvanometer, als Batterie einige Akkumulatoren.

Fig. 109 zeigt eine solche Thomsonsche Meßbrücke in der Ausführung von Siemens u. Halske. Der Meßdraht, aus dickem Neusilber, ist um einen runden Holzsockel gelegt, in dessen Innerem die Widerstandsrollen, und auf welchem, oben, die Stöpseleinrichtungen sich befinden. Auf der linken Seite sieht man den drehbaren Kontaktarm mit Griff und vertikalem Messingstück, das bis zu der kreisförmigen Skala reicht und dieselbe mittels Nonius ablesen läßt. Vorn sind die Klemmen zum Einschalten von Batterie, Galvanometer und dem unbekannten Widerstande mit zwei Tastern für Batterie und Galvanometer.

Sehr hohe Widerstände; Kabelmessungen. Für sehr hohe Widerstände wird der Strom, den man bei direkter Schließung der Batterie durch einen solchen Widerstand erhält, so klein, daß die volle Empfindlichkeit der feinsten Spiegelgalvanometer benutzt werden muß; es bleibt daher nichts übrig, als den Strom einer starken Batterie durch Galvanometer und unbe-

kannten Widerstand zu schicken, die Ablenkung zu beobachten und aus derselben mit Hilfe der Empfindlichkeitsbestimmung den Widerstand zu berechnen.

Hohe Widerstände kommen namentlich bei Isolationsmessungen vor, d. h. bei der Messung des Widerstandes von isolierenden Substanzen, mit welchen die Leitungsdrähte von elektrischen Anlagen und von Telegraphen- und Telephonkabeln eingehüllt sind, und von Porzellanglocken und an-

Fig. 109.



deren Isolierkörpern, durch welche blanke Kupferleitungen unterstützt werden.

Wie groß die technische Wichtigkeit des Isolationsmaterials bei unterirdischen und unterseeischen Telegraphenkabeln ist, erhellt schon aus der Tatsache, daß bereits in den 40er Jahren des vorigen Jahrhunderts W. Siemens in Deutschland Guttaperchakabel fabriziert und gelegt hatte, daß aber nach einiger Zeit die Isolationsfähigkeit der Guttapercha sich so verschlechtert hatte, daß das Telegraphieren unmöglich wurde. Als man anfing, namentlich von England aus, unterseeische Kabel zu legen, im Roten und Mittelländischem Meer und im Ärmelkanal, hielten sich die Kabel schon länger, aber nicht auf die Dauer. Es bedurfte großer Geduld und Zähigkeit, um die Isolationsfähigkeit der in

Betracht kommenden Materialien zu studieren, die technische Behandlung derselben, stets im Hinblick auf die Isolation, richtig zu leiten, Erfahrungen über die Dauerhaftigkeit der Isolationsfähigkeit zu sammeln, die Operationen bei der Legung unterseeischer Kabel ohne Beschädigung der Guttapercha durchzuführen usw., bis es endlich gelang, einigermaßen dauerhafte Kabel, namentlich über den Atlantischen Ozean, herzustellen und zu legen. Dazu kam noch, daß die Guttapercha, ein Baumsaft, ohne jede Sorgfalt gewonnen wird, und daher die verschiedenen Sorten derselben genau kennen gelernt werden mußten, um so mehr, als dieselbe noch lange nach der Legung des Kabels das Bestreben zeigt, sich von der Kupferseele los zu lösen und in sich zu zerreißen. Man bedenke, daß bei einem atlantischen Kabel ein einziges Loch in der Guttaperchahülle, welches die Kupferseele auf ganz geringe Länge freilegt, genügt, um das Telegraphieren zu verhindern.

Die Ausbildung dieser Technik, welche zunächst viele Jahre scheinbar unfruchtbarer Arbeit in Anspruch nahm, zuerst in England erfolgte und später sich auf Deutschland und Frankreich verbreitete, beruht auf der Messung der Isolationswiderstände und zwar in allen Stadien der Fabrikation von der Untersuchung des natürlichen Produktes bis zu dem fertigen Kabel, dann während und nach der Legung, überhaupt, wo sich eine Gelegenheit bietet, eine Messung zu nehmen.

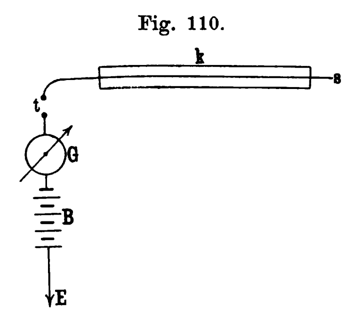
Für diesen Zweck, bei welchem die höchsten Widerstände vorkommen, etwa 1 bis 100 000 Mill. Ohm, war es notwendig, vor allem, die Empfindlichkeit der Messung auf das höchste Maß zu treiben, ferner aber, da die betreffenden Widerstände sich in einem fort verändern, die Messung so zu gestalten, daß man diese Veränderungen ohne Unterbrechung verfolgen kann.

Diese Forderungen lassen sich nur erfüllen, wenn man stetig an einem möglichst empfindlichen Galvanometer den Isolationsstrom beobachtet, d. h. den Strom, den eine starke, konstante Batterie — von wenigstens 100 Elementen — zeigt, wenn sie mit einem Pol an Erde, mit dem anderen Pol an das eine Ende des Kabels gelegt wird, während das andere Ende sorgfältig isoliert ist (s. Fig. 110: *E* Erde, *B* Batterie, *G* Galvanometer, *k* Kabel, *s* Kupferseele). Dieser Strom geht von der Kupferseele durch die Isolationshülle nach der Erde, da das Kabel in Wasser

gelegt und das letztere mit Erde (Gas- oder Wasserleitung, Erdplatten usw.) verbunden ist.

Der Isolationswiderstand läßt sich leicht berechnen, indem man vor der Messung einen bekannten, hohen Widerstand, z. B. 100 000 Ohm, einschaltet und die Ablenkung desselben mit derjenigen des Isolationsstromes vergleicht, da sich die Widerstände umgekehrt verhalten wie die Ströme. Bei diesen Messungen muß ferner ausgiebiger Gebrauch von den S. 241 besprochenen, dekadischen Nebenschlüssen gemacht werden, welche hierbei zuerst in Verwendung kamen.

Fig. 110.

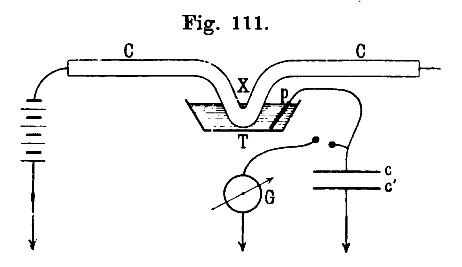


Als Galvanometer diente und dient noch hauptsächlich das Thomsonsche Spiegelgalvanometer (s. S. 21), mit feinstem Kupferdraht bewickelt und durch zweckmäßige Einstellung des Richtmagnets auf die höchste Empfindlichkeit gebracht.

Bei einer solchen Messung wird der Isolationsstrom wenigstens mehrere Minuten lang beobachtet; die Art seines Sinkens, die An- oder Abwesenheit von Zuckungen und sein absoluter Wert sind Kennzeichen, aus welchen, auf der Grundlage langer Erfahrung, auf die Güte der Isolation geschlossen wird.

Gewöhnlich wird die Isolation von größeren Längen, wenigstens etwa 10 m, genommen, indem nur das zu messende Stück in Wasser gelegt wird und dessen Enden an der Oberfläche sorgfältig getrocknet und gereinigt werden; soll aber die Isolation eines kurzen Stückes, namentlich nach Herstellung einer Lötstelle, gemessen werden, so muß die Empfindlichkeit der Messung noch bedeutend erhöht werden.

Fig. 111.



Zu diesem Zweck legt man (Fig. 111) die Lötstelle X, zu deren beiden Seiten die Guttaperchaoberfläche sorgfältigst ge-

reinigt wird, in einen mit Wasser gefüllten und mit eingelegter Kupferplatte p versehenen Guttaperchatrog, gibt Batterie in das Kabel C und fängt den durch die Isolationshülle der Lötstelle hindurchgehenden elektrischen Strom in dem Kondensator $c\,c'$ auf, indem man dessen eine Belegung an die Kupferplatte p, die andere an Erde legt; man läßt den Kondensator längere Zeit, bis etwa $^1/_2$ Stunde, sich laden und schickt dann die Ladung, durch Verbindung der beiden getrennten Punkte, durch das an einem Ende mit Erde verbundene Galvanometer. Aus dem Ausschlag des letzteren, bei Kenntnis der Kapazität des Kondensators und der Spannung der Batterie, läßt sich dann der Isolationswiderstand der die Lötstelle umgebenden Guttapercha berechnen.

Eine solche Messung, die nicht vorsichtig genug ausgeführt werden kann, bildet z. B. den Schlußakt der Legung eines atlantischen Kabels. Dasselbe wird beinahe stets von beiden Ufern aus gelegt, so daß die Verbindung beider Stücke auf offenem Meere erfolgen muß. Beide Enden werden an Bord desselben Schiffes gebracht, die beiden Uferstationen werden veranlaßt, zu einer bestimmten Zeit Batterie anzulegen; dann werden die beiden Kupferseelen verbunden und verlötet, mit Guttapercha umgeben, die aufs sorgfältigste mit derjenigen der beiden Kabelstücke verbunden wird, und dann die Lötstellenmessung ausgeführt, nachdem von den Ufern aus Batterie gegeben ist. Bei gutem Ausfall derselben werden die beiden nun verbundenen Enden ins Meer versenkt, und die beiden Stationen können in telegraphische Verbindung treten.

Bei unterirdischen Kabeln für Telegraphie oder Zentralanlagen sind die Meßoperationen im wesentlichen dieselben, jedoch viel leichter, da man überall zu dem Kabel gelangen kann.

Um solche Kabel bei der Verlegung zu messen, wird ein Wagen mit allen erforderlichen Meßgeräten ausgerüstet und an diejenigen Punkte gefahren, an denen sich Messungen ausführen lassen. Zur Aufstellung des Spiegelgalvanometers dient ein langer, metallener Dreifuß, der durch eine Öffnung im Fußboden des Wagens auf die Erde heruntergelassen wird. Fig. 112 gibt eine Vorstellung eines solchen Meßwagens.

Um bei oberirdischen oder in Häusern verlegten elektrischen Leitungen Isolationen zu messen, verfährt man einfacher durch Anwendung von kompendiösen, kleinen Kasten, welche alles zur

Messung Nötige, auch eine kleine Batterie oder Magnetmaschine und ein empfindliches Galvanoskop, enthalten. Die Isolationswiderstände sind in diesem Fall meist viel geringer, als bei guten Kabeln, und die von der Messung verlangte Genauigkeit ist nur mäßig.

Einfluß von Ladung und Selbstinduktion. Nachdem wir die Messung sehr kleiner und sehr hoher Widerstände erwähnt haben, welche nicht mit der Wheatstoneschen Brücke vorgenommen werden, kehren wir zu der Betrachtung der Entwickelung dieser letzteren zurück.

Fig. 112.



Als die ersten langen Guttaperchakabel gelegt waren, zeigte die Telegraphie auf denselben den großen Einfluß der statischen Ladung oder der Kapazität der Kabel auf die Sprechgeschwindigkeit. W. Siemens, später Sir W. Thomson beschäftigten sich mit dieser Frage theoretisch und praktisch, und als man erkannt hatte, daß diese elektrische Eigenschaft der Kabel dem Telegraphieren in denselben bei großen Längen eine Grenze setzen könne, verwandte man auch bei der Fabrikation der Kabel immer mehr Aufmerksamkeit auf die Ladungsfähigkeit derselben.

Auch auf die Messung des Kupferwiderstandes der Kabel hat die Ladung großen Einfluß, wenn man bei der Bestimmung mittels der Wheatstoneschen Brücke ebenso verfährt, wie bei Drähten, d. h. wenn man nur kurze Ströme gibt und nach den Galvanometerausschlägen das Gleichgewicht einzustellen sucht. Denn, während in den Drahtzweigen der Brücke

der stationäre Strom sich in unnennbar kurzer Zeit nach der Stromschließung einstellt, stellt sich der stationäre Strom in dem das Kabel enthaltenden Zweig nur allmählich ein, und während dieser Zeit entspricht der Strom im Galvanometerzweig nicht der Widerstandsproportion der Brücke; wenn z. B. die vier Zweige im richtigen Verhältnis stehen, fließt in dieser Anfangsperiode doch Strom durch das Galvanometer, um dem Kabel Elektrizität zuzuführen.

Dieser Übelstand wird dadurch leicht beseitigt, daß man bei der Messung zunächst das Galvanometer kurz schließt, Strom in die Brücke gibt, und zwar so lange, bis das Kabel geladen ist, und dann erst den Kurzschluß des Galvanometers aufhebt; die Ablenkung, die dann das Galvanometer zeigt, entspricht den Widerstandsverhältnissen, da der Ladungsstrom aufgehört hat.

Ein ähnlicher Fehler der Brückenmessung kann entstehen, wenn der zu messende Widerstand Selbstinduktion besitzt, d. h. wenn die einzelnen Teile desselben während des Anwachsens des Stromes induzierend aufeinander wirken und das Anwachsen verlangsamen; namentlich tritt dies bei der Messung des Widerstandes von Elektromagnetrollen auf. In den Brückenzweigen, welche aus ausgespannten Drähten oder bifilar gewickelten Widerstandsrollen bestehen, ist Selbstinduktion kaum bemerkbar, wenn, wie hier vorausgesetzt, Gleichstrom, nicht Wechselstrom, in die Brücke gegeben wird.

Wie die Ladung, so tritt auch die Selbstinduktion nur auf, solange der Strom sich ändert, hier also, solange der Strom noch nicht stationär geworden ist; wenn man daher verfährt wie bei der Widerstandsmessung von Kabeln, und das Galvanometer erst frei gibt, nachdem die Selbstinduktion sich verlaufen hat, und auch dann nicht Ausschläge, sondern Ablenkungen mißt, so ist die Widerstandsmessung richtig.

Einfluß von elektromotorischen Kräften; Widerstand von Zersetzungszellen, Batterien usw. Von Wichtigkeit ist der Fall, wenn der zu messende Widerstand mit elektromotorischer Kraft verbunden ist, wie solche galvanische Zersetzungszellen, Batterien, Akkumulatoren, Kondensatoren mit starker Rückstandsbildung, animalische Körperteile, Gleichstrommaschinen, elektrische Lichtbögen usw. zeigen.

Für den Zweck der Widerstandsmessung ist es gleichgültig, ob die elektromotorische Kraft auch ohne Strom besteht, wie in einer Batterie, oder sich erst durch den Strom als elektromotorische Gegenkraft entwickelt, wie in einer galvanischen Zersetzungszelle.

Wir betrachten nun die Entwickelung der Widerstandsmessung bei galvanischen Zersetzungszellen, und zwar erwähnen wir zunächst eine ältere Methode, diejenige von F. Neumann (1857) (in der Modifikation von Wild).

Bei einer vom Strom durchflossenen Zersetzungszelle sind drei Größen zu unterscheiden: der Widerstand der Flüssigkeit (w), der Übergangswiderstand (Oxyd-, Säureschichten usw.) zwischen Flüssigkeit und Elektroden (u) und die elektromotorische Kraft der Polarisation (p), welche sämtlich voneinander zu trennen und einzeln zu bestimmen sind.

Hierzu benutzte Neumann eine zwei Zweige enthaltende Schaltung mit Differentialgalvanometer, welche von Wild in eine Brückenschaltung mit einfachem Galvanometer verändert wurde (s. Fig. 113), wo $w_1 w_1$ gleiche Brückenzweige, Z die Zersetzungszelle, W ein regulierbarer Widerstand (z. B. Wheatstonescher Rheostat), B die Batterie, T eine Tangentenbussole, G ein Galvanometer, U ein zweiter Rheostat, t ein Kontakt bedeuten.

Fig. 113.

Man schiebt zunächst die gereinigten Elektroden der Zersetzungszelle dicht zusammen, stellt durch Regulieren von U auf eine bestimmte, an der Tangentenbussole abzulesende Stromstärke J ein, und reguliert dann W so, daß das Galvanometer keinen Strom zeigt. Dann rückt man die Elektroden auf eine bestimmte Entfernung auseinander, reguliert U wieder auf denselben Strom J und stellt dann W wieder auf Galvanometerstrom Null ein; dann muß sein, wenn w' der in W hinzugekommene Widerstand, und w, u, p die oben angegebenen Größen bedeuten:

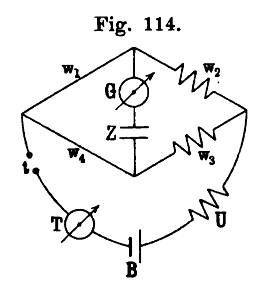
$$w' = w + u + \frac{2p}{J},$$

da $\frac{J}{2}$ der in der Zersetzungszelle fließende Strom.

Wiederholt man dieselbe Bestimmung bei derselben Stromstärke, aber bei einer anderen Elektrodenentfernung, so muß w sich dieser Entfernung proportional verhalten, und aus den Unterschieden der gefundenen Werte von w' ergeben sich die Werte der Flüssigkeitswiderstände.

Um das von der Polarisation abhängende Glied $\frac{2p}{J}$ zu bestimmen, werden w_1 und w_4 verschieden genommen und die Schaltung so eingerichtet, daß durch einen Umschalter ein im Seitenzweig liegender Rheostat w_3 und die im Galvanometerzweig liegende Zersetzungszelle Z schnell mit einander vertauscht werden können; in w_3 wird ein Widerstand so eingeschaltet, daß unmittelbar nach der Einschaltung von Z in den Galvanometerzweig das Galvanometer keinen Strom hat. Dann läßt sich der im Zweig 3 bei Einschaltung der Zelle herrschende Strom, im Verhältnis zum Hauptstrom J, aus den Seitenwiderständen bestimmen und die Größe p berechnen.

Fig. 114.



Hat man für eine Anzahl von Strömen p bestimmt, so kann man durch Interpolation das Verhältnis $\frac{2p}{J}$, das für den in der ersten Messung (Fig. 113) herrschenden Strom J gilt, berechnen und in das Resultat dieser letzteren einsetzen; da der Flüssigkeitswiderstand w bereits bekannt ist, so ergibt sich auch der für den Strom J geltende Wert des Übergangswiderstandes u.

Diese Methode ist zwar exakt, aber nicht ganz einfach und der Schwierigkeit unterworfen, daß die Umschaltung bei der Polarisationsmessung ohne den geringsten Zeitverlust erfolgen muß, was allerdings ausführbar ist.

Als F. Kohlrausch 1880 seine umfangreichen und genauen Untersuchungen über den Widerstand der Flüssigkeiten begann, bediente er sich einer Methode, welche diesen Widerstand direkt ergibt, ohne Komplikation mit Polarisation und Übergangswiderstand; er erreichte dies durch Anwendung von Wechselstrom, d. h. einer Kette von schnell aufeinander folgenden gleichen Stromimpulsen wechselnder Richtung. Dann bildet sich weder Polari-

sation noch Übergangswiderstand, oder, wenn sie entstehen, so heben sie sich in der Summe auf und man erhält bei der Brückenmessung unmittelbar den Flüssigkeitswiderstand; allerdings mußten hierbei die Elektroden so gewählt und so vorbereitet werden, daß die genannten Größen sich genau aufhoben.

Um einen für diese Messungen tauglichen Wechselstrom zu erhalten, bediente sich Kohlrausch des schon damals für andere Zwecke in allgemeinem Gebrauch befindlichen Induktionsapparates von Ruhmkorff. Dieser Apparat besteht bekanntlich aus zwei Drahtwickelungen, einer primären, mit Eisenkern versehenen, und einer sekundären; in die primäre wird ein sich selbst in selbsttätiger Weise regelmäßig unterbrechender Strom gegeben, in der sekundären entstehen alsdann Stromimpulse von wechselnder Richtung und gleicher Elektrizitätsmenge, welche durch besondere Vorkehrungen einander auch in der Form möglichst gleich gemacht werden können. Die sekundäre Wickelung s, deren Widerstand den in der Brücke vorkommenden Widerständen ähnlich gewählt wurde, trat an Stelle der Batterie in der Brücke (s. Fig. 115), während die primäre Wickelung p mit der Erregungsbatterie B und dem Unterbrecher t einen besonderen Stromkreis bildete.

Fig. 115.

Die Anwendung von Wechselstrom verhinderte jedoch die Benutzung eines Galvanometers im Galvanometerzweig, weil ein solches nur auf Gleichstrom anspricht. Es wurde daher ersetzt durch ein Elektrodynamometer mit Spiegelablesung, welches auf dem von W. Weber gegebenen Prinzip beruhte, aber von Kohlrausch, den modernen Ansprüchen entsprechend, so modifiziert wurde, siehe auch S. 69 ff., daß die Schwingungsdauer bedeutend verringert und eine kräftige Dämpfung hinzugefügt wurde; die Beobachtungszeit wurde dadurch, gegen früher, wesentlich abgekürzt.

Später wurde dieses Instrument durch ein Telephon ersetzt, wie bereits S. 62 erwähnt wurde. Die Einstellung wurde hierdurch empfindlicher; denn Wechselströme, welche im Elektro-

dynamometer eine kaum bemerkbare Ablenkung verursachen, sind im Telephon noch deutlich hörbar. Bei Einschaltung des Stromes hört man im Telephon ein Brummen, und es ist nun der Widerstand von einem oder zwei Brückenzweigen so lange zu verändern, bis das Brummen aufhört. Läßt sich dasselbe nicht ganz wegbringen, so liegt dies meist an ungenügender Vorbereitung der Elektroden, welche aus Platinblech bestehen und nach einer bestimmten von Lummer und Kohlrausch herrührenden Vorschrift platiniert werden sollen. Gelingt es auch bei Beachtung derselben nicht, das Brummen ganz zu vermeiden, so wird auf das Minimum desselben eingestellt.

Die Messung ist nicht so empfindlich, wie eine Brückenmessung von Metallwiderständen mit Gleichstrom und Spiegelgalvanometer, gibt aber dennoch bei sorgfältiger Behandlung genügende Genauigkeit.

Die Brückenzweige, außer der Zersetzungszelle, dürfen nur ganz geringe Selbstinduktion und Kapazität enthalten; die gewöhnlichen Widerstandsskalen sind indessen auch hierzu brauchbar. Oft wendet man auch hier, namentlich um den Einfluß der Selbstinduktion zu vermindern, einen ausgespannten Meßdraht an.

Diese Messungen sind bekanntlich über die meisten Elektrolyten ausgedehnt worden und haben eine der Grundlagen geschaffen, auf welcher die heutige Elektrochemie beruht.

Die Messung des Widerstandes von Körpern, z. B. von galvanischen Batterien, die mit konstanten elektromotorischen Kräften behaftet sind, gestaltet sich anders, als bei den Zersetzungszellen, wo die elektromotorische Kraft der Polarisation von der Stromstärke abhängt.

Mance war der erste, welcher zeigte, daß, wenn die elektromotorische Kraft im wesentlichen konstant ist, wie bei einer guten Batterie, der Widerstand der Batterie sich auch mit der Brücke messen läßt.

Er schaltet die zu messende Batterie B_x in einen Seitenzweig, z. B. 4, Fig. 116, ein, in den gewöhnlich Batterie enthaltenden Diagonalzweig dagegen keine Batterie, sondern nur einen Unterbrecher t, so daß Ausschläge im Galvanometer nur durch das Vorhandensein von Batterie im Seitenzweig zustande kommen; er beobachtet die Galvanometerablenkung, wenn der Unterbrecher t offen ist (sogenannte falsche Null), und stellt die Brückenzweige

so ein, daß bei geschlossenem Unterbrecher t dieselbe Ablenkung im Galvanometer erfolgt. Der Widerstand der Batterie ergibt sich aus der Widerstandsproportion der Zweige wie gewöhnlich.

Diese Methode ist, wie auch die nachfolgenden Brückenmethoden, nur dann richtig, wenn die elektromotorischen Kräfte in einem oder mehreren Seitenzweigen sich nicht wesentlich ändern, wenn t geschlossen und geöffnet wird, wodurch sich ja die Ströme der Seitenzweige ändern.

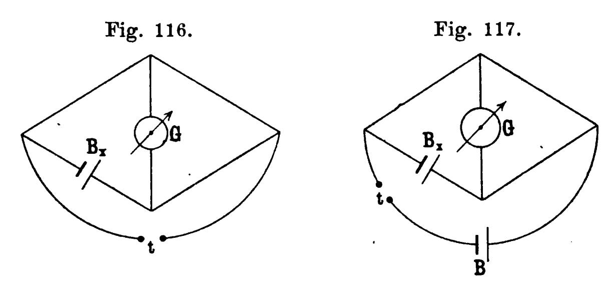


Fig. 116. Fig. 117.

Lutteroth schaltet zu demselben Zweck auch in den Diagonalzweig W eine Batterie B (siehe Fig. 117); bei der Messung verfährt er wie Mance.

Der Verfasser[1]) hat nun gezeigt, daß man in alle sechs Zweige der Brücke konstante elektromotorische Kräfte setzen kann, ohne daß die Widerstandsproportion ihre Gültigkeit verliert; nur muß man bei der Messung verfahren wie oben, d. h. so einstellen, daß die Galvanometerablenkung bei offenem und geschlossenem Diagonalzweig dieselbe ist.

Dieser Satz bietet die Möglichkeit einer strengen Scheidung zwischen elektromotorischer Kraft und Widerstand auch in denjenigen Fällen, in welchen diese Scheidung schwierig ist; namentlich klären sich hierdurch Fälle auf, in welchen es unsicher ist, ob der bei Stromdurchgang beobachtete Spannungsabfall außer vom Widerstand auch von einer elektromotorischen Gegenkraft herrührt; so konnten derartige Gegenkräfte nachgewiesen werden bei dem elektrischen Lichtbogen — wo allerdings derselbe Nachweis bereits durch V. v. Lang, aber auf viel umständlicherem Wege, geliefert worden war — und bei einem

[1]) Elektrotechn. Zeitschr. 1886, S. 483.

Kondensator, der aus mit Harz überzogenem Papier bestand und nach Entladung starken Rückstand zeigte.

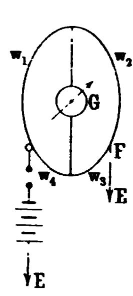
Die Voraussetzung, daß bei offenem und geschlossenem Diagonalzweig die elektromotorischen Kräfte der Seitenzweige sich nur unwesentlich ändern, ist allen Brückenmethoden gemeinsam und muß durch Wahl eines empfindlichen Galvanometers und großen Widerstand im Diagonalzweig möglichst erfüllt werden.

Fehlerbestimmungen. Die Wheatstonesche Brücke wird endlich verwendet zu Fehlerbestimmungen in elektrischen Leitungen.

Da die in dem zu schließenden und zu öffnenden Diagonalzweig liegende Batterie die Messung nur in der Weise beeinflußt, daß die Empfindlichkeit derselben je nach der Größe der Batterie sich richtet, die Einstellung der Seitenzweige aber nicht von derselben abhängt, und da ferner Schwankungen in der Batterie sich bei der Messung kaum bemerklich machen, sucht man die Fehlerstelle, welche meist als eine unkonstante galvanische Zersetzungsstelle anzusehen ist, in diesen Batteriezweig einzuschalten.

Sind die beiden Enden, s. Fig. 118, der fehlerhaften Leitung am Ort der Messung zugänglich, so bildet man aus derselben die Seitenzweige w_2 und w_3, schaltet den der Schaltung abgekehrten Pol der Meßbatterie an Erde (E) und verschiebt den Kontakt an dem die Seitenzweige w_1 und w_4 bildenden ausgespannten Draht, bis das Galvanometer bei Schließung und Öffnung des Unterbrechers keinen Ausschlag zeigt. Dann geben die an dem ausgespannten Draht durch den Batteriezweig abgeteilten Längen w_1, w_4 ein direktes Bild von der Lage des Fehlers F, der auch an Erde liegt, in der fehlerhaften Leitung. Diese Messung läßt sich mit großer Schärfe ausführen, sowohl an oberirdischen wie unterirdischen und unterseeischen Leitungen.

Fig. 118.



Sind zwei nebeneinander liegende Leitungen, eine fehlerhafte und eine im wesentlichen fehlerlose, zugänglich, so verbindet man dieselben am entfernten Ende, so daß die fehlerlose die Fortsetzung der fehlerhaften Leitung bildet.

Ist nur ein Ende der fehlerhaften Leitung zugänglich, wie z. B. bei einem abgerissenen Unterseekabel, so gibt es keine genaue Methode zur Ortsbestimmung des Fehlers; man sucht sich alsdann mit verschiedenen Mitteln, deren Besprechung hier zu weit führen würde, wenigstens ein ungefähres Urteil über den Fehlerort zu verschaffen.

Messung des Widerstandes aus Strom und Spannung. Eine Art der Widerstandsmessung, die zwar seltener vorkommt, aber Platz greifen muß, wenn eine andere brauchbare Methode fehlt, ist die Berechnung aus Stromstärke und Spannungsdifferenz.

Bekanntlich ist nach dem Ohmschen Gesetz der Widerstand W irgend eines vom Strom durchlaufenen Leiters

$$W = \frac{P}{J},$$

wo P die Spannungsdifferenz an den Enden des Leiters und J die Stromstärke; zu dieser Messung sind also zwei gleichzeitige Messungen von Spannung und Stromstärke nötig.

Eine solche Messung ist nötig z. B. an der oberen Kohlenelektrode eines elektrischen Ofens. Dieselbe, eine Kohlenstange oder ein Kohlenrohr von durchschnittlich etwa 1,5 m Länge und meist über 1000 cm² Querschnitt, befindet sich am unteren Ende, wo sich der Lichtbogen bildet, in hoher Weißglut, am oberen Ende meist in einer Temperatur von mehreren hundert Graden; es fragt sich, wie groß der Widerstand der Elektrode und die in derselben verlorene elektrische Energie ist. Man drückt zu diesem Zwecke am oberen Ende und möglichst nahe am unteren Ende Kohlenstücke an, von welchen Drähte zum Spannungsmesser führen, und mißt gleichzeitig Spannung und Stromstärke. Hieraus ergibt sich durch Rechnung der Widerstand der Elektrode, soweit sie zugänglich ist, im warmen Zustande, der mit der Messung im kalten Zustande verglichen wird, und des Energieverlustes A nach der Gleichung:

$$A = PJ.$$

Isolationswiderstand von Anlagen im Betrieb. Diese Aufgabe läßt sich nicht mit den bisher besprochenen Methoden behandeln, teils weil die Spannungen in den elektrischen Anlagen meist ziemlich hohe sind und diejenige einer Meßbatterie noch

bedeutend höher sein mußte, teils weil Ströme und Spannungen der Anlage fortwährend wechseln, und aus anderen Gründen. Man greift daher diese Aufgabe an einem Punkte an, der mit der Isolation innig zusammenhängt, meist aber nicht mit dem Wechsel innerhalb der Anlage, und welcher in allen anderen ähnlichen Aufgaben unberücksichtigt blieb, nämlich der absoluten elektrischen Spannnung gegen Erde.

Wenn eine elektrische Anlage, bestehend z. B. aus einer Gleichstrommaschine und einem äußeren Kreis, absolut isoliert ist und nicht die geringste Verbindung mit Erde hat, so sind zwar ihre relativen Spannungen oder ihre Spannungsunterschiede, z. B. zwischen den beiden Maschinenpolen, und die Spannungsunterschiede im äußeren Kreis, genau bestimmt, die absolute Spannung dagegen, oder die Spannung irgend eines Punktes des Stromkreises gegen Erde, in keiner Weise; für diese Spannungen muß noch ein Moment hinzutreten, welches dieselben bestimmt.

Dieses Moment sind die Isolationsfehler; dieselben sind durchaus immer vorhanden, weil auch das best isolierende Material nie vollkommen isoliert, sondern nur höchstens einen sehr hohen Isolationswiderstand besitzt, und weil der Einfluß der Feuchtigkeit, die stets leitet, sich nie ganz ausschließen läßt.

Hat nun die Anlage einen einzigen Isolationsfehler an einer bestimmten Stelle, so nimmt diese Stelle die absolute Spannung der Erde an; es geht dann kein Strom aus der Anlage in die Erde, aber es ordnen sich die absoluten Spannungen in der Anlage nach derjenigen dieser Stelle so, daß die durch den Maschinenstrom bedingten Spannungsunterschiede dieselben bleiben, wie bei absoluter Isolation.

Hat die Anlage zwei Isolationsfehler, an zwei verschiedenen Stellen, so ordnen sich die absoluten Spannungen in der Anlage so an, daß durch die eine Stelle Strom aus der Anlage nach der Erde hin, durch die andere von der Erde nach der Anlage fließt, und zwar, daß diese beiden Ströme gleich sind, also von dem in der Maschine entwickelten Strom nichts verloren geht. Die eine Stelle hat dann positive Spannung gegen Erde, die andere negative.

Hat die Anlage endlich eine Menge Isolationsfehler, wie es in Wirklichkeit stets der Fall ist, so stellen sich an den Fehler-

stellen Teilströme her, die teils nach der Erde hin gehen, teils von der Erde herkommen, deren algebraische Summe aber Null ist.

Die absoluten Spannungen in einer Anlage hängen daher von den Isolationsfehlern unmittelbar ab.

Nun lassen sich aber jene Isolationsströme nicht messen, da man ihre Stellen nicht kennt, und, auch wenn dies bekannt wäre, eine solche Messung sehr schwierig wäre. Aber es ist leicht, künstliche Fehler herzustellen und in diesen den Strom zu messen, einfach dadurch, daß man einen Punkt des Stromkreises durch ein Galvanometer mit Erde verbindet und den Strom mißt; die absolute Spannung des betreffenden Punktes, nach Anlegung dieses künstlichen Fehlers, ergibt sich dann leicht, indem man die gemessene Stromstärke mit dem Widerstande des Galvanometerzweiges multipliziert.

Verändert man ferner den Widerstand dieses künstlichen Fehlers, legt denselben an verschiedene Punkte des Stromkreises, bringt mehrere solche Fehler an, kurz, verwertet man diese Methode in geeigneter Weise, so kann man die Isolationswiderstände der ganzen Anlage und einzelner Punkte derselben bestimmen und während des Betriebes weiter verfolgen.

Der Verfasser [1]) hat dieses Gebiet wohl zuerst bearbeitet und eine Reihe von Methoden angegeben, mittels deren die Isolation einer Anlage und diejenige der sogenannten Sammelschienen, d. h. der vom Maschinenhause zu den Häusern oder Verbrauchsorten führenden Hauptleitungen, einzeln sich bestimmen läßt; er hat auch ein Instrument angegeben, welches die Größe der Isolation selbsttätig angibt. Andere haben später dieses Gebiet weiter bearbeitet.

Den Techniker interessiert hierbei am meisten die Bestimmung der Orte gröberer Fehler, weil solche baldmöglichst entfernt werden müssen, und zwar, ehe deren Einfluß so stark geworden ist, daß der Betrieb der Anlage oder eines Teiles der Anlage eingestellt werden muß.

Auch auf diesem Gebiete ist bereits manches geschehen; indessen ist man noch nicht zu Methoden vorgedrungen, deren An-

[1]) O. Frölich, Isolations- und Fehlerbestimmungen an elektrischen Anlagen. Halle a. S., W. Knapp, 1895.

wendung so leicht und sicher ist, daß ihre allgemeinere Einführung sich empfiehlt.

Wir begnügen uns hier, im allgemeinen auf diese Bestimmungen der Isolation und der Fehlerorte aufmerksam zu machen.

Methoden zur Messung der Selbstinduktion.

Die Selbstinduktion ist eine elektromotorische Gegenkraft, welche der Strom selbst erzeugt und durch welche er gehemmt wird. In einem ausgespannten Draht ist sie bereits vorhanden, wenn schon in sehr geringem Maße; sie ist um so größer, je mehr nahe aneinander liegende Windungen der Strom zu durchlaufen hat, und ist am stärksten, wenn die Windungen um einen massiven Eisenkern gelagert sind. Die geblätterten, d. h. aus isolierten dünnen Eisenblechen bestehenden, bei Elektromagneten verwendeten Eisenkerne, welche man heute allgemein beim Bau der Wechselstrommaschinen und auch zum Teil der Gleichstrommaschinen benutzt, zeigen bedeutend geringere Selbstinduktion, als Elektromagnete mit massiven Eisenkernen, aber viel mehr als Drahtrollen ohne Eisenkern. Da jedoch in der Elektrotechnik bloße Drahtrollen zu geringe Wirkung ergeben und Eisenkerne verwendet werden müssen, spielt die Selbstinduktion in der Wechselstromtechnik eine wichtige Rolle.

Zu der Selbstinduktion gesellen sich noch andere Einflüsse, welche zwar anders geartet sind, deren Bestimmung sich jedoch mit derjenigen der Selbstinduktion verbinden läßt, das ist die Kapazität, d. h. die Ladungsfähigkeit der Stromleiter, und die Wirbelströme (Foucaultsche Ströme), welche in der Nachbarschaft der Stromleiter in massiven Metallstücken entstehen.

Die Selbstinduktion ist bekanntlich ein Grenzfall der gegenseitigen Induktion, d. h. derjenigen, welche ein Stromkreis auf einen benachbarten ausübt, sei es, wenn in dem einen Kreis

Strom entsteht oder verschwindet, sei es, wenn die relative Lage der beiden Kreise sich ändert. Deshalb schließt sich die mathematische Behandlung sowohl, als die Messung der Selbstinduktion, an diejenige der gegenseitigen Induktion an. Allein die letztere ist weniger Gegenstand der Messung als die erstere, wenigstens in der Technik; denn, wenn heutzutage die Eigenschaften eines Transformators, d. h. eines Apparates der gegenseitigen Induktion festgestellt werden sollen, so mißt man nicht den Koeffizienten der gegenseitigen Induktion, sondern man schickt in die primäre Wickelung die volle elektrische Wechselstromenergie, welche sie aufnehmen kann, und mißt im sekundären Kreise die übertragene Energie.

Die Erscheinungen der Induktion, auch diejenigen der Selbstinduktion, wurden von Faraday entdeckt, und von ihm stammen auch die Beziehungen der Induktion zu den magnetischen Kraftlinien, welche heutzutage die Grundlage des Baues der elektrischen Maschinen bilden. Die mathematische Behandlung des Gegenstandes wurde eröffnet durch Lenz, welcher zeigte, daß der induzierte Strom stets eine solche Richtung annehme, daß durch denselben der primäre Strom gehemmt werde. Dann leitete Neumann die Grundgesetze der Induktion ab durch Einführung des elektromagnetischen Potentials, welches sich an das magnetische Potential von Gauss anschließt; Helmholtz und W. Thomson endlich zeigten die Beziehungen der Induktionsströme zu dem Prinzip der Erhaltung der Energie.

Weber stellte eine eigene Theorie des elektrischen Stromes auf und behandelte nach derselben die Induktionserscheinungen; sein Hauptverdienst aber auf diesem Gebiet besteht darin, daß er auch diese Erscheinungen in den Kreis seiner elektrodynamischen Maßbestimmungen zog, durch sorgfältig messende Versuche die theoretischen Ergebnisse prüfte und sie einfügte in sein absolutes Maßsystem.

Methoden von Maxwell. Die Meßmethoden für die verschiedenen Arten der Induktion, welche, modifiziert, noch heutzutage, namentlich für technische Zwecke, benutzt werden, wurden von Maxwell[1]) in Verbindung mit seiner umfassenden

---

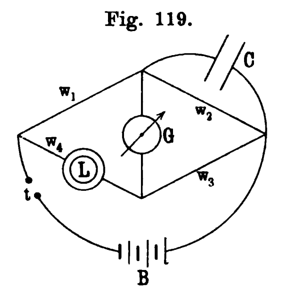
[1]) Maxwell, Electricity and Magnetism. London 1873, Vol. II, p. 352, 377.

und neuartigen Behandlung der magnetischen und elektrischen Erscheinungen gegeben. Sie bestehen in einer Erweiterung der Wheatstoneschen Brücke in dieser Richtung und zeigen aufs neue, wie groß der Bereich und die Vorteile dieser Meßmethode sind. Die Wheatstonesche Brücke beruht auf einem gewissen Gleichgewicht dauernder, konstanter Gleichströme; da indessen die Selbstinduktion und ihre Verwandten nur bei sich ändernden Strömen auftreten, muß zu ihrer Bestimmung die konstante Batterie in dem Unterbrechungszweige durch einen kurzen Stromstoß oder einen aus elektrischen Wellen bestehenden Wechselstrom ersetzt werden. Da ferner im Galvanometerzweig ebenfalls Stromstöße oder Stromwellen auftreten, müssen daselbst Instrumente eingeschaltet werden, welche diese Stromformen, welche wir allgemein als Wechselstrom bezeichnen wollen, anzeigen.

Das Gleichgewicht der Brücke aber ist im allgemeinen ein anderes bei konstantem Gleichstrom als bei Wechselstrom, jedes der beiden Gleichgewichte bei Null im Galvanometerzweig gibt eine andere Relation zwischen den Widerständen bzw. Induktionskonstanten der Seitenzweige, und man muß, wenn Induktionen vorhanden sind, beide Relationen kennen, um in einem Zweige nicht nur den Widerstand, sondern auch die betreffende Art der Induktion bzw. die Kapazität oder den Einfluß der Wirbelströme zu bestimmen.

Die Maxwellschen Methoden, bei welchen als „Wechselstrom" ein einzelner Stromstoß benutzt wird, sind die folgenden.

Fig. 119.



Um eine Selbstinduktion (L) mit einer Kapazität (C) zu vergleichen, werden (s. Fig. 119) der die erstere enthaltende Leiter vom Widerstande w_4 in einen, der Kondensator (C) mit der Nebenschließung vom Widerstande w_2 in den ihm gegenüberliegenden Seitenzweig geschaltet. Die Bedingung, daß bei dauerndem Gleichstrom das Galvanometer keine Ablenkung zeige, ist die bei der Wheatstoneschen Brücke geltende, nämlich:

$$w_2 w_4 = w_1 w_3.$$

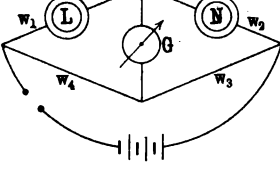
Die Bedingung ferner, daß bei Ein- und Ausschalten der Batterie kein momentaner Ausschlag im Galvanometer auftrete, ist

$$w_2 w_4 = \frac{L}{C}.$$

Sollen beide Bedingungen zugleich erfüllt werden, das Galvanometer weder einen momentanen Ausschlag, noch eine dauernde Ablenkung zeigen, so muß z. B. erst das Gleichgewicht für Dauerstrom zwischen den vier Widerständen hergestellt werden, und dann, ohne dieses Gleichgewicht zu ändern, auch dasjenige zwischen den Widerständen und Kapazität bzw. Selbstinduktion der Zweige w_2, w_4, für einen Stromstoß eingestellt werden. Dies kann geschehen, indem man bei der letzteren Einstellung das Produkt $w_2 w_4$ stets konstant hält, d. h. jeder Änderung von w_2 eine entsprechende Gegenänderung von w_4 folgen läßt.

Um zwei Selbstinduktionen L und N zu vergleichen, werden dieselben in zwei benachbarte Zweige, z. B. w_1 und w_2, eingeschaltet (s. Fig. 120). Für das Gleichgewicht bei dauerndem Strom ist die Bedingung wieder

Fig. 120.



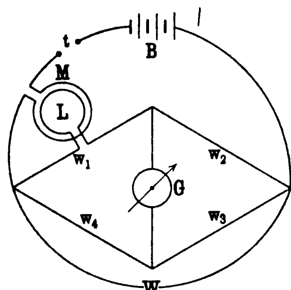
$$w_2 w_4 = w_1 w_3,$$

für dasjenige bei momentanem Strom

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{L}{N}.$$

Nach Einstellung des Gleichgewichtes bei dauerndem Strom muß dasjenige bei momentanem Strom so gesucht werden, daß das Verhältnis $\frac{w_1}{w_2}$ stets gleich bleibt.

Fig. 121.



Um eine Selbstinduktion (L) mit einer gegenseitigen Induktion (M) an demselben Rollenpaar zu vergleichen, wird (s. Fig. 121) die primäre Rolle in den Batteriezweig, die sekundäre Rolle, deren Selbstinduktion L, in einen Seitenzweig, z. B. w_1, der Brücke eingeschaltet. Für das Gleichgewicht bei dauerndem Strom ist wieder

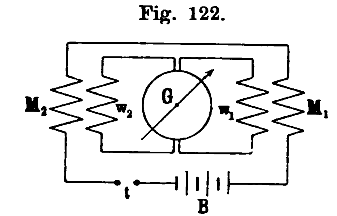
$$w_2 w_4 = w_1 w_3,$$

für dasjenige bei momentanem Strom

$$-\frac{L}{M} = 1 + \frac{w_1}{w_4}.$$

Sollen zwei gegenseitige Induktionen M_1 und M_2 miteinander verglichen werden, so wird die Differentialschaltung (Fig. 122) angewendet, in welcher die beiden primären Rollen im Batteriekreis liegen, das Galvanometer parallel zu den beiden sekundären Rollen, so daß dasselbe die Differenz der beiden Induktionsstöße erhält. Dann ist, wenn w_1, w_2, die Widerstände der sekundären Rollen, im Gleichgewicht für momentanen Strom

Fig. 122.



$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{w_2}{w_1}.$$

Diese Methoden bilden ein geschlossenes System zwischen Kapazität, Selbstinduktion und gegenseitiger Induktion; wenn eine dieser Größen in absolutem Maße bekannt ist, so lassen sich die beiden anderen ebenfalls in absolutem Maße bestimmen.

Neuere Methoden. Durch Maxwell ist zwar die Frage dieser Messungen theoretisch gelöst, und seine Methoden sind auch ausführbar, wenn auch nicht gerade in bequemer Weise. Seine Methoden haben sich jedoch in der Folge, den wechselnden wissenschaftlichen und technischen Bedürfnissen und den Fortschritten der Instrumententechnik entsprechend, entwickelt, und wir geben daher nachstehend die Art, wie die Selbstinduktionsmessungen heutzutage in Deutschland, namentlich seit den Arbeiten von M. Wien [1]), gehandhabt werden [2]).

Das Bedürfnis der Neuzeit für wissenschaftliche und technische Zwecke geht weniger nach der Bestimmung der Koeffizienten der Selbstinduktion, wie sie Maxwell behandelt, als nach derjenigen des Einflusses der Selbstinduktion bei regelmäßigen elektrischen Wellen oder Wechselströmen. Hierbei bewirkt aber

---

[1]) M. Wien, Wied. Ann. **44**, 689 (1891) und **66**, 870 (1898).
[2]) Dolezalek, Zeitschr. f. Instrumentenkunde 1903, Heft 8.

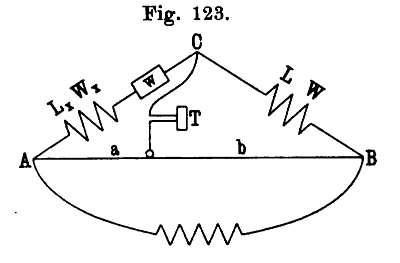
die Selbstinduktion sowohl eine Phasenverschiedenheit zwischen Strom und Spannung, als auch eine scheinbare Vermehrung des Ohmschen Widerstandes, welche von dem Produkt der Selbstinduktionskoeffizienten und der Periodenzahl pro Sekunde abhängt; es ist also dieses Produkt zu bestimmen.

Ferner sind heutzutage diese Messungen wesentlich erleichtert durch den Umstand, daß man nicht nur Skalen von induktionsfreien Widerständen, sondern auch Skalen von Leitern mit genau gemessenen Beträgen der Selbstinduktion in der „Henry" genannten absoluten Einheit, besitzt. Wie also bei dem Widerstande, so ist auch bei Selbstinduktion die absolute Messung unnötig und genügt die Vergleichung mit gegebenen Normalien.

Endlich sind wir heute zur Beobachtung bei diesen Messungen nicht mehr auf das „ballistische", d. h. mit momentanen Ausschlägen benutzte Galvanometer angewiesen, sondern wir besitzen vorzügliche Instrumente zur Beobachtung von dauernden elektrischen Wellen, nämlich das Telephon, welches dieselben hörbar, und das optische Telephon und das Vibrationsgalvanometer und ähnliche Apparate, welche dieselben sichtbar machen. Wenn wir also in die Brücke einen dauernden Wechselstrom schicken, so können wir an einem solchen Instrumente im Galvanometerzweige das Verschwinden des Wechselstromes scharf erkennen.

Freilich tritt bei dieser Form der Messung eine neue Schwierigkeit hinzu, nämlich die Forderung der Theorie, daß der Wechselstrom möglichst wie eine einzige Sinusfunktion der Zeit verläuft, oder daß er möglichst frei sei von „Obertönen", d. h. von anderen Sinusfunktionen höherer Ordnung. Diese Schwierigkeit wird meist dadurch beseitigt, daß man in den stromgebenden Zweig einen Kondensator von solcher Kapazität einschaltet, daß nur der „Hauptton", d. h. die Sinusfunktion von niedrigster Periodenzahl, verstärkt wird, und die „Obertöne" verschwinden; dieses Mittel trägt den Namen des Prinzips der „Resonanz", da dasselbe ganz ähnlich bei der Herstellung eines reinen Tones durch die Helmholtzschen Resonatoren verwendet wird.

Fig. 123.



Die Messung verläuft nun folgendermaßen (s. Fig. 123). Zwei Seitenzweige der Brücke, a, b, werden durch einen ausgespannten Draht mit Schleifkontakt gebildet; im dritten Seitenzweige liegt die Normale vom Widerstande W und der Selbstinduktion L, im vierten der zu bestimmende Leiter, der den Widerstand W_x, die Selbstinduktion L_x, besitzt und im Wechselstrom noch außerdem Wirbelströme in Metallteilen, Hysteresis in Eisenteilen usw. zeigt, und die Skala von induktionslosen Widerständen, w.

Man stellt, wie nach den Maxwellschen Methoden, auf zwei verschiedene Gleichgewichte ein, dasjenige des dauernden Gleichstromes und dasjenige des momentanen Gleichstromes, das hier durch dauernden Wechselstrom ersetzt ist. Für das erstere wird zur Beobachtung im Galvanometerzweig ein Galvanometer, für das letztere ein Telephon eingeschaltet; bei dem ersteren wird auf dauernde Ablenkung Null, bei dem letzteren auf dauernde Abwesenheit eines Tones oder brummenden Geräusches eingestellt.

Der Unterschied jedoch gegenüber den Maxwellschen Methoden liegt darin, daß das Gleichstromgleichgewicht nicht auch bei dem Wechselstromgleichgewicht festgehalten wird, sondern daß, wenn man nach der Einstellung des letzteren dauernden Gleichstrom gibt, das Galvanometer nicht Null zeigt, sondern abgelenkt wird. Man stellt zuerst das Wechselstromgleichgewicht her, indem man abwechselnd den Schleifkontakt an dem ausgespannten Draht verschiebt und im Widerstandskasten w stöpselt; verschwindet der Ton im Telephon, so ist

$$\frac{W_x + w}{W} = \frac{a}{b} \quad \text{und zugleich} \quad \frac{L_x}{L} = \frac{a}{b}.$$

Dann setzt man das Galvanometer statt des Telephons ein, gibt dauernden Gleichstrom und fügt, ohne den Schleifkontakt zu verändern, im Widerstandskasten w den Widerstand z hinzu, bis das Galvanometer Null zeigt. Dieser Widerstand z, mit dem Quadrate des Stromes multipliziert, gibt die pro Sekunde in dem Apparate durch Hysteresis, Wirbelstrom usw. (nicht Selbstinduktion) verloren gehende Stromenergie in Watt.

Die Werte der wirksamen Selbstinduktion L_x und des wirksamen Widerstandes W_x ergeben sich aus obigen Gleichungen.

Messungen für Fernsprechzwecke. Diese Messungen haben nun heutzutage auch Bedeutung für ein Gebiet, welches erst in letzter Zeit durch den Amerikaner Pupin praktisch eröffnet wurde, nämlich die Adaptierung langer, ober- oder unterirdischer Leitungen für den Telephonverkehr.

Der schädliche Einfluß, den lange Leitungen auf das Fernsprechen ausüben, besteht teils in einer Schwächung, teils in einer Verzerrung des Tones, so daß bei jeder Leitung von einer gewissen Länge an das Fernsprechen unmöglich ist. Verstärkt man den Querschnitt der Leitung und deren Leitfähigkeit, indem man Kupfer oder ein anderes gutleitendes Metall als Material wählt, so verbessert sich die Sprache, aber es steigen auch die Kosten in bedeutendem Maße. Die Ursache des schädlichen Einflusses ist namentlich die Kapazität, oder die Ladungsfähigkeit der Leitung.

Man hat nun seit langem bereits auf theoretischem Wege gefunden, daß, wenn die Selbstinduktion der Leitung erheblich verstärkt wird, ohne Änderung der Kapazität, die Sprache verbessert wird, obschon die Selbstinduktion für sich ebenfalls die Sprache verschlechtert. Es waren auch mannigfache Versuche unternommen worden, um auf diese Art die Sprache zu verbessern, ohne daß brauchbare Resultate erzielt wurden.

Klarheit kam erst in diese Frage, als man anfing, die Selbstinduktionen neben den Kapazitäten zahlenmäßig genau zu bestimmen, und außerdem an der Hand der Theorie die Art zu bestimmen, wie die Selbstinduktion einer Leitung verstärkt werden muß, um zum Ziele zu kommen.

Pupin fand, daß die nötige Verstärkung der Selbstinduktion nur durch Einschaltung von vielen gleichmäßig verteilten Spulen von bestimmter, ziemlich hoher Selbstinduktion in die Leitung erzielt werden könne und daß möglichst viele Spulen und in geringen Abständen anzuwenden seien.

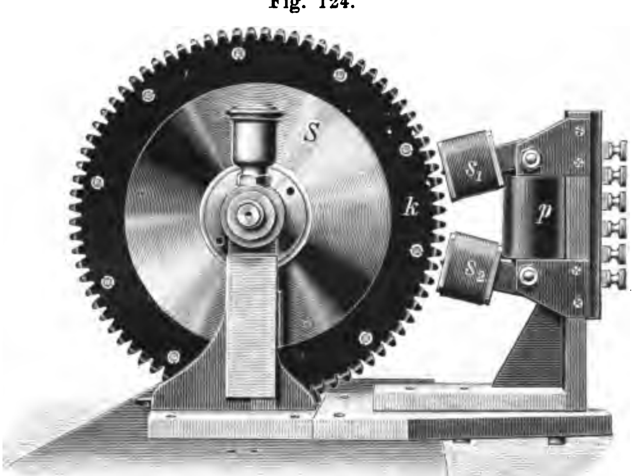
Er erzielte dann auch auf diese Weise bedeutende Erfolge, und die Entfernungen, auf welchen man mit seinem Systeme auf verhältnismäßig wenig kostspieligen Leitungen sich noch gut telephonisch verständigen kann, sind viel größer als früher. Die Einführung seines Systems jedoch erforderte genaue Messungen, nicht nur des Widerstandes und der Kapazität der Leitungen, wie früher, sondern auch der Selbstinduktion, und zwar für alle Ton-

höhen bzw. alle elektrischen Wellen, welche beim Fernsprechen vorkommen.

Dies war mittels der oben angedeuteten Meßmethoden und der zugehörigen Instrumente möglich, wenn noch eine kleine Maschine hinzugefügt wurde, mittels deren sich elektrische Wellen von der verschiedensten Frequenz, wie sie eben beim Fernsprechen vorkommen, erzeugen ließen.

Einen hierzu geeigneten Wellensender, welcher bei Siemens und Halske, welche das System Pupin in Europa verbreiten, benutzt wurde, zeigt Fig. 124.

Fig. 124.



Eine gezahnte Eisenscheibe S, welche aus vielen sehr dünnen, voneinander durch Lack isolierten und durch den Horngummikranz k zusammengehaltenen Blechscheiben besteht, bildet den rotierenden Anker. Den Zähnen seitlich gegenüber steht ein hufeisenförmiger Elektromagnet mit der Erregerspule p und den auf die Pole aufgesetzten Spulen s_1, s_2; wird die Scheibe gedreht, so entstehen in diesen letzteren, ähnlich wie in der Spule eines Telephons, Induktionsstöße, entsprechend dem Vorübergehen der Zähne. Die Anzahl der Zähne ist 100, die Tourenzahl der Scheibe, welche durch einen Elektromotor angetrieben wird, bis etwa 66 pro Sekunde; es erfolgen also bis 6600 Induktionsstöße pro Sekunde, was einem

sehr hohen Ton entspricht. Die Kurve der Ströme weicht wenig von einer Sinuslinie ab; der z. B. in einem Telephon erzeugte Ton ist also ziemlich rein und kann durch elektrische Resonanz noch völlig rein oder vielmehr einfach gemacht werden. Man kann also mit einfachen Tönen in den verschiedensten Höhenlagen arbeiten und die Resultate, namentlich durch elektrische Messungen vor und hinter der Linie, mit der Theorie vergleichen.

Auch bei dem Baue von unterseeischen Telephonkabeln hat die kaiserl. deutsche Reichspostverwaltung durch ähnliche Studien schöne Erfolge erzielt. In diesem Falle darf man es wegen mechanischer Unzuträglichkeiten nicht wagen, längs des Kabels, wie bei oberirdischen Linien, Körper mit Selbstinduktion anzubringen, sondern muß sich darauf beschränken, eine möglichst dicke Eisendrahthülle als Träger der Selbstinduktion zu benutzen und die inliegenden Leitungen so zu wählen, daß deren Ladung und Selbstinduktion sich wenigstens bis zu einem gewissen Grade aufheben und daher gute Sprechfähigkeit gestatten.

Die Methoden der Wechselstrommessung.

Wir stellen im folgenden die Methoden der Wechselstrommessung, welche bei verschiedenen Gelegenheiten erwähnt wurden, zusammen und vervollständigen dieselben.

Ein Wechselstrom, mag er durch eine Maschine oder durch einen anderen Apparat, z. B. Induktionsapparat, erzeugt sein, ist durch folgende Merkmale, bezogen auf ein Stück des Stromkreises, charakterisiert: Periodenzahl pro Sekunde, mittlere Stromstärke, mittlere Spannung, mittlere Energie, Phasenunterschied zwischen Stromstärke und Spannung, die Form der Strom- bzw. Spannungskurve, ferner von dem betreffenden Stück des Stromkreises den Ohmschen und den wirksamen Widerstand, die Selbstinduktion und die Kapazität.

Diese Momente stehen mehr oder weniger in innerem Zusammenhange, dessen mathematische Form sich aber nur aufstellen läßt, wenn die Stromkurve ganz oder nahezu sinusartig verläuft.

Die Periodenzahl pro Sekunde (ganze Periode) wird, wenn der Wechselstrom von einer Maschine herrührt, bestimmt, indem man die Umdrehungszahl derselben pro Sekunde durch einen Tourenzähler mißt und mit der halben Anzahl der erzeugenden Magnete oder Elektromagnete multipliziert.

Ein feineres Mittel dieser Bestimmung ist der Apparat von Hartmann und Braun (R. Kempf-Hartmann), in welchem eine Skala von stählernen, auf verschiedene Töne abgestimmten Zungen durch Drehung vor einem vom Maschinenstrome erregten Elektromagneten vorbeigeführt wird, und diejenige Zunge in starke Bewegung gerät, deren Ton mit der Periodenzahl nahe übereinstimmt, sich also die Periodenzahl unmittelbar ablesen läßt. Die mittlere Stromstärke bzw. Spannung wird bestimmt durch Elektrodynamometer (s. S. 59 ff.) oder durch Induktionsmeßinstrumente nach Ferraris Prinzip (s. S. 72 ff.). Diese Instrumente geben jedoch ein Mittel des Quadrates der Stromstärke oder der Spannung, aus welchem die gesuchten Mittelwerte sich nur bei Sinusströmen berechnen lassen; bei wesentlich anderer Form der Ströme muß diese Form selbst bei der betreffenden Periodenzahl bekannt sein, um die Mittel der quadratischen und der einfachen Größen in richtige, gegenseitige Beziehung zu setzen.

Die mittlere Energie $PJ \cos \varphi$ wird ebenfalls durch Elektrodynamometer oder Ferraris-Apparat bestimmt. Kennt man die Mittel der Spannung und der Stromstärke und den Phasenunterschied, so dient der gemessene Wert der Energie zur Kontrolle der Bestimmungen dieser Größen.

Für den Phasenunterschied φ hat man zwei Bestimmungsmethoden, die eine durch Division des gemessenen Wertes der Energie durch die gemessenen Werte der Stromstärke und Spannung, wodurch sich $\cos \varphi$ ergibt, die andere durch die Messung von $PJ \sin \varphi$ mittels des Ferrarisschen Drehfeldes und Division durch PJ.

Die genauere Deutung der elektrischen Meßresultate findet sich erst, wenn man durch einen Oscillograph die Form der betreffenden Strom- bzw. Spannungskurven festlegt und daraus die mittleren Intensitäten der einfachen und der quadratischen Größen berechnet. Ebenso sollte auch die Spannungskurve an der leerlaufenden Maschine bestimmt werden.

An dem betreffenden Stücke des Stromkreises läßt sich zunächst der Ohmsche Widerstand, d. h. derjenige für Gleichstrom, mittels der hierfür gegebenen Methoden bestimmen oder auch, wenn die Leitfähigkeit und die Dimensionen des Leiters bekannt sind, berechnen.

Der sogenannte wirksame Widerstand des Stückes, der für Wechselstrom von der in Betracht kommenden Periode gilt, läßt sich mit der S. 185 angedeuteten Brückenmessung bestimmen, ebenso die Selbstinduktion.

Die Kapazität des Stückes endlich kann, wie diejenige eines Kabels, durch den bei isoliertem Ende auftretenden Ladungsstrom gemessen werden.

Diese letzteren, an dem Stücke angestellten Messungen dienen ebenfalls zur Erklärung der im Betriebe angestellten Messungen.

Auch aus dieser gedrängten Übersicht erhellt, wie viel komplizierter die genaue Bestimmung eines Wechselstromes ausfällt als diejenige eines Gleichstromes.

Rückblick.

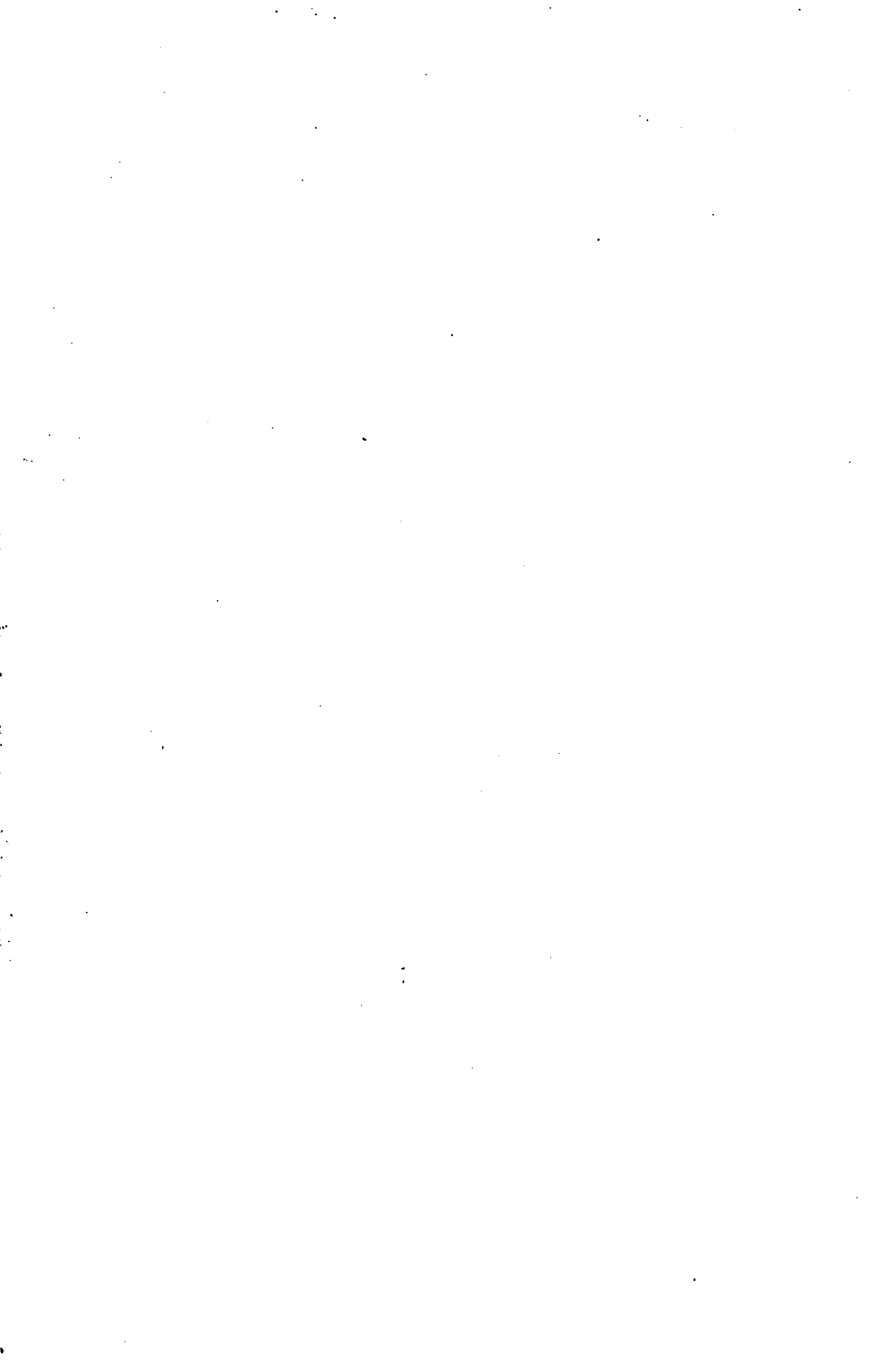
In den Stammbäumen alter Geschlechter sieht man einen starken Mann am Boden liegen, aus dessen Brust ein Baum hervorwächst, um sich in Äste, Zweige und Zweiglein zu spalten, welche sämtlich mit Namen bezeichnet sind, und deren jüngste grünes Laub tragen. Einen ähnlichen Eindruck gewinnen wir, wenn wir die Entwickelung der elektrischen Meßinstrumente überblicken: der Stand der Gegenwart zeigt eine große Anzahl derselben, zum Teil sinnreiche, neue Prinzipien betätigend, alle im Bau die Fortschritte der Neuzeit aufweisend, und daher die Bezeichnung des „Grünens“ wohl verdienend, während den Ursprung der Entwickelung ein einziger Versuch bildet, der Versuch von Oersted, neben welchem höchstens noch die Coulombsche Drehwage als Ausgangspunkt genannt zu werden verdient.

Die Meßinstrumente haben sich ja nicht selbständig entwickelt, sondern im Dienste und als Werkzeuge der elektrischen Forschung, in neuerer Zeit auch als wesentliche Hilfsmittel für die technische Erzeugung des elektrischen Stromes, welcher heutzutage einen beinahe ebenso wichtigen Bestandteil unseres Lebens und Verbrauches bildet, wie die Nahrungsmittel oder die Mineralschätze der Erde.

Die Meßinstrumente haben aber nicht nur als Werkzeuge gedient beim Aufbau der Wissenschaft, sondern haben auch befruchtend gewirkt; wie oft mag der Besitz eines guten Meßinstrumentes im Geist des Forschers einen neuen Gedankengang erweckt haben!

Wenn wir uns vergegenwärtigen, wer die Erzeuger von elektrischen Meßinstrumenten in alter und in neuer Zeit waren, so erkennen wir eine große Verschiebung; während am Anfang der Entwickelung und noch vor etwa einem halben Jahrhundert der Gelehrte den Apparat, meist bis in alle Einzelheiten, erdachte und der Mechaniker beinahe nur ausführte, hat sich heutzutage der Techniker beinahe ganz nicht nur des Baues, sondern auch der Weiterentwickelung der Instrumente und der Angabe neuer Prinzipien bemächtigt; freilich stellen sich auch immer mehr wissenschaftlich erzogene Forscher in den Dienst der Technik.

Fast will es dem Verfasser dieses Schriftchens scheinen, als ob der jetzige Zeitpunkt zur Darstellung der Entwickelung der elektrischen Meßinstrumente besonders geeignet sei; denn die Bahn dieser Entwickelung hat sich in neuerer Zeit dermaßen verbreitert, daß ein bedeutendes Anwachsen der Breite der Bahn in der Zukunft nicht sehr wahrscheinlich erscheint, und es jetzt mehr als später das Interesse des Kundigen erwecken muß, diese Entwickelung von den bescheidenen Anfängen bis zu dem heutigen Stande zu verfolgen.






QC 543
F7
150977



